



Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®
Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“FILTRACIÓN DE AIRE EN CABINA DE
IMPRESORA 3D FDM CON FILAMENTO ABS”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

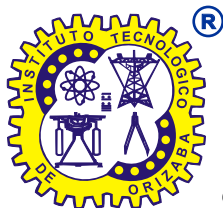
Ing. Yair Antonio Romero Cantero

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Ignacio Herrera Aguilar

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gerardo Águila Rodríguez



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

JUNIO 2025



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **29/mayo/2025**

Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. YAIR ANTONIO ROMERO CANTERO

Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

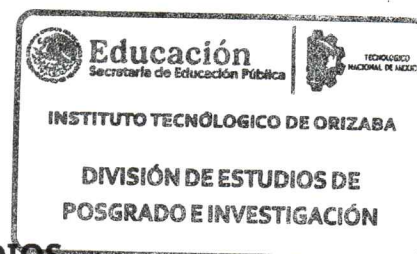
" FILTRACIÓN DE AIRE EN CABINA DE IMPRESORA 3D FDM CON FILAMENTO ABS"

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **26/mayo/2025**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

YAIR ANTONIO ROMERO CANTERO

La cual lleva el título de:

"FILTRACIÓN DE AIRE EN CABINA DE IMPRESORA 3D FDM CON FILAMENTO ABS"

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

FIRMA

SECRETARIO: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL SUP.: M.C. ENRIQUE ALEJANDRO CUELLAR
CORTÉS

FIRMA

TA-09-18



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata; C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. INTRODUCCIÓN	5
1.2. PROBLEMÁTICA	6
1.3. JUSTIFICACIÓN	7
1.4. HIPÓTESIS	8
1.5. OBJETIVO GENERAL	8
1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.7. METODOLOGÍA	9
1.8. ESTADO DEL ARTE	10
1.9. MARCO TEÓRICO	15
CAPÍTULO 2. APLICACIÓN EXPERIMENTAL	21
RESUMEN DE CAPÍTULO	21
2.1. Simulación de flujo de aire	21
2.2. Construcción de la estructura de la cabina.	24
2.3. Filtro	26
2.4. Desarrollo de la parte electrónica	28
2.5. Habitáculo del sensor de gases	48
2.6. Interfaz gráfica	50
2.7. Programación en Python	52
2.8. Figura modelo de prueba	56
2.9. Protocolo propuesto de medición	58
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	60
RESUMEN CAPÍTULO	60
3.1. Convertidor PWM a corriente	60
3.2. Circuito escalador	62
3.3. Mediciones pruebas	64
3.4. Comparación de gráficas	68
CONCLUSIÓN	69
REFERENCIAS	70

Tabla de ilustraciones

Figura 1. Esquema de distribución de tamaño de partículas.[23]	18
Figura 2. Estructura del sensor.....	19
Figura 3. Tabla con dimensiones de impresora 3D.	21
Figura 4. Dimensiones de impresora 3D Creality Ender 3.....	22
Figura 5. Diseño 3D cabina.	22
Figura 6. Enmallado de cabina en SimFlow.....	23
Figura 7. Simulación sin impresora.	23
Figura 8. Simulación con impresora.	24
Figura 9. Chasis de la cabina.	25
Figura 10. Cabina con tapas de policarbonato.....	25
Figura 11. Tabla de materiales para la estructura.....	26
Figura 12. Imagen de filtro HEPA.	27
Figura 13. Soporte diseñado para filtro HEPA.....	27
Figura 14. Impresión 3D de soporte del filtro.	28
Figura 15. Especificaciones eléctricas de sensor TGS2620.	28
Figura 16. Circuito básico con TGS2620.	29
Figura 17. Características del dominio de frecuencia de un filtro pasa bajas.....	30
Figura 18. Valores propuestos para filtro pasa bajas.....	30
Figura 19. Filtro pasa bajas Sallen-Key de segundo orden.....	31
Figura 20. Diagrama polo-zero de ecuación 8.....	34
Figura 21. Diagrama de Bode de función de transferencia del filtro pasa bajas.	34
Figura 22. Circuito esquemático del convertidor de voltaje a corriente y la fuente de corriente....	35
Figura 23. Circuito esquemático de circuito de variación de temperatura en sensor de gas.....	36
Figura 24. Circuito esquemático para sensado de corriente en resistencia calefactora del sensor de gas.	38
Figura 25. Circuito esquemático del sensor salida del sensor de gas a un restador.....	39
Figura 26. Diseño PCB para sensor de gas.....	40
Figura 27. Circuito impreso manufacturado para sensor de gas.	41
Figura 28. Circuito esquemático de escalador de voltaje.	42
Figura 29. Diseño y manufactura de circuito escalador de voltaje.	43
Figura 30. Rangos de medición del sensor DTH22.	44
Figura 31. Diagrama de conexión entre Raspberry Pi 4 y el microcontrolador RP2040 para sensado de temperatura.	44
Figura 32. Circuito controlador de fase.....	46
Figura 33. Diseño y manufactura de modulo controlador de fase.	46
Figura 34. Forma de onda de 110 VCA A 60 Hz para 0°,90° y 160° respectivamente.....	47
Figura 35. Diagrama de circuito del módulo complementario de Raspberry pi 4.	48
Figura 36. Diseño y manufactura de circuito módulo complementario de Raspberry pi 4.	48

Figura 37. Diseño asistido por computadora de habitáculo del sensor de TGS2620.	49
Figura 38. Diseño impreso del habitáculo.....	49
Figura 39. Sensor de gas dentro de habitáculo en su posición final en la cabina.....	50
Figura 40. Diseño y manufactura de carcasa para pantalla.	51
Figura 41. Interfaz de usuario diseñada en QTDesigner.	51
Figura 42. Diagrama a bloques del sistema.....	52
Figura 43. Interfaz desde la Raspberry pi 4.....	53
Figura 44. Diagrama de flujo para programación de ADC.....	54
Figura 45. Forma de onda AC con representación de tiempos.....	55
Figura 46. Diagrama de flujo para programación de modulo controlador de fase.	56
Figura 47. Modelo para prueba de sistema.	57
Figura 48. Parámetros de impresora.....	57
Figura 49. Condiciones de prueba 1.....	58
Figura 50. Condiciones de prueba 2.....	59
Figura 51. Condiciones de prueba 3.....	59
Figura 52. Resultados de convertidor PWM a corriente.....	60
Figura 53. Gráfica de relación ciclo de trabajo y voltaje de salida.....	61
Figura 54. Gráfica de relación ciclo de trabajo y corriente en sensor.....	62
Figura 55. Simulación circuito escalador en Multisim 13.....	63
Figura 56. Valores de simulación en barrido en CD.	63
Figura 57. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 1.....	64
Figura 58. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 1.	65
Figura 59. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 2.....	66
Figura 60. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 2.	66
Figura 61. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 3.....	67
Figura 62. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 3.	67
Figura 63. Comparación de resultados de sensor de gas en las pruebas.	68

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la impresión en 3D tiene gran relevancia debido a las posibilidades y ventajas que conlleva para manufacturar piezas con esta técnica. Las impresoras 3D se emplean en casi todas las áreas del conocimiento para el desarrollo de prototipos.

Con el pasar de los años y debido a la demanda que tienen, en la actualidad se pueden encontrar impresoras a precios muy accesibles. En el 2015 este mercado alcanzó los 3,8 billones de dólares, cifra que se verá fuertemente incrementada para el 2021 alcanzando los 10,8 billones de dólares. Por lo tanto, en solo seis años el mercado aumentará en 184%.[3]

La tecnología de modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling, FDM), constituye uno de los procesos de fabricación aditiva más utilizada, debido a su accesibilidad operativa y rentabilidad. Este método se basa en la extrusión controlada de un filamento termoplástico, usualmente acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o ácido poliláctico(PLA). el cual se deposita capa por capa para la conformación de piezas con geometrías complejas. [3]

En el proyecto de investigación se presenta una propuesta para reducir el problema de emisión de gases tóxicos durante el proceso de impresión 3D, mediante la implementación de un filtro para disminuir la exposición del usuario al ambiente contaminado por dichos gases.

1.2. PROBLEMÁTICA

¿La impresión 3D es segura?

Las impresoras 3D FDM tienen a su alrededor muchas inquietudes a cerca de los posibles efectos a la salud y al medio ambiente, debido a las emisiones tóxicas de partículas y de gases de efecto invernadero, liberados en el proceso de impresión que pueden deteriorar la calidad del aire en el espacio de trabajo y del medio ambiente en general.

El modelo de deposición fundida funciona calentando filamento termoplástico y extruyéndose desde una boquilla. Es el calentamiento del termoplástico el que ocasiona la liberación de material particulado y gases volátiles. Dentro de estas emisiones se encuentran algunos componentes irritantes y/o cancerígenos que en concentraciones suficientes y en espacios con poco flujo de aire supone un riesgo para las personas presentes.

El material particulado desprendido puede comprender apenas unos nanómetros a varios micrómetros. La contaminación del aire por partículas ultrafinas (UFP) se considera peligrosa para la salud debido a que son capaces de penetrar a través de los pulmones y llegar al torrente sanguíneo, además que la exposición prolongada puede provocar irritación en las mucosas de las personas.

Hablando particularmente del filamento de ABS, donde se requiere mayor temperatura en la boquilla del extrusor, se han registrado liberación de gases como monóxido de carbono y cianuro de hidrogeno, que en concentraciones suficientes pueden incluso generar la muerte. Los compuestos que se han medido en mayores concentraciones en la fundición del ABS son el estireno y el etilbenceno, ambos compuestos pueden generar irritación de ojos y garganta entre otras cosas.[8]

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la empresa Desarrollo, Asesoría y Solución en Proyectos de Electrónica y Mecatrónica (DASPEM), se cuenta con un área de impresión con equipos Creality Ender 3 donde se tienen ciertos parámetros no controlados, incluyendo la parte de gases expulsados por el material fundido. En la implementación de una cámara con sistema electrónico c con filtración de aire en sus impresoras 3D, la empresa DASPEM brindará un servicio seguro y confiable además de un ambiente laboral seguro para sus empleados.

En el contexto actual la implementación de impresoras 3D es algo que se ha convertido en herramientas indispensable para ciertas áreas y procesos.

Usualmente las impresoras 3D se emplean en espacios cerrados con poca circulación de aire, esto provoca que la misma calidad del aire se vea afectada y las personas que se encuentren cerca pueden terminar expuestas a estos gases y partículas que pueden comprometer su salud.

La exposición a compuestos como el estireno y el etilbenceno en altas concentraciones pueden causar irritación e incluso desequilibrio, por otra parte, concentraciones bajas puede generar daños irreversibles en la audición de animales, así como daños en los riñones. Ambos compuestos están catalogados como posibles compuestos carcinogénicos en humanos.

Por otro lado, la contaminación del aire por partículas ultrafinas se le relaciona con inflamación pulmonar y cardiovascular, además que puede generar situaciones adversas a aquellas personas que ya tienen problemas respiratorios o cardiovasculares.

Debido a la poca investigación sobre las emisiones de impresoras 3D FDM, actualmente el mercado de filtros especializados para impresoras 3D es muy limitado, los modelos que actualmente se comercializan presentan ciertas características que complica su aplicación en una cabina con ambiente controlado, por lo que se buscará una alternativa que cumpla con los requerimientos de empresa.

1.4. HIPÓTESIS

Es posible reducir las emisiones contaminantes de gases tóxicos generados durante el proceso de impresión 3D por deposición fundida de filamento de ABS mediante el uso de un sistema de filtrado basado en filtros aire de alta eficiencia.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de filtración para las emisiones contaminantes en una cabina de impresora 3D FDM con filamento ABS.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el estado del arte para determinar la viabilidad del proyecto.
- Construir una cabina para la impresora ENDER 3.
- Implementar mecanismo para succión de aire.
- Implementar un sistema de filtrado para el aire dentro de la cabina.
- Hacer uso de sensores para saber la calidad del aire dentro de la cabina y el aire filtrado.
- Diseñar una interfaz para monitorear los parámetros medidos.

1.7. METODOLOGÍA

Actividad	Descripción	Resultado
1.- Documentación teórica	Se buscará información relacionada como parte de los antecedentes.	Estado del arte.
2.- Construcción de cabina	Analizar la estructura de la impresora Creality Ender 3 para la construcción de la cámara, así como también determinar los materiales a ocupar.	Ambiente controlado.
3.- Implementar mecanismo de succión de aire	Realizar simulaciones y pruebas experimentales para establecer el sistema de circulación de aire.	Mecanismo para circulación de aire.
4.- Implementar sistema de filtrado	Realizar pruebas necesarias para determinar los gases involucrados en las emisiones de la impresión. Determinar qué sistema de filtrado cumple con los requerimientos del proyecto y adaptarlo al prototipo que se está desarrollando.	Sistema de filtración de aire.
5.- Sensores de calidad de aire	Determinar qué tipo de sensores se van a emplear para medir las variables de interés. Hacer la parte electrónica del sensor, así como su implementación en PCB.	PCB con el sistema de sensado. Calibración
6.- Diseño de interfaz	Programar una interfaz para que el usuario interactúe con el sistema. Implementar un microcontrolador para hacer lectura de datos e interactuar con los actuadores.	Interfaz.
7.- Evaluación de diseños	Evaluar la eficiencia de los sistemas implementados en pasos anteriores, así como su implementación en conjunto. Recolección de datos.	Resultados del prototipo.
8.- Análisis y procesamiento de datos	Analizar los datos obtenidos.	Conclusiones.

1.8. ESTADO DEL ARTE

En el artículo (Blanca Pérez-Uz. M. Isabel de Silóniz, 2010) se menciona que la esterilización por filtración en microbiología, destacando su aplicación para eliminar microorganismos sin destruirlos, mediante filtros de poro específico ($0,22\ \mu\text{m}$ o menores). Subrayan el uso de filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) en cámaras de flujo laminar como método eficaz para mantener condiciones estériles en entornos de laboratorio altamente controlados.

En el trabajo de C.I. Paulo (2013) se presentó un modelo de programación no lineal (NLP) orientado a la optimización del proceso de separación y clasificación de partículas con diámetros entre $0,5$ y $10\ \mu\text{m}$. Para este fin, los investigadores implementaron un sistema compuesto por un alimentador de material particulado, un ciclón de alta eficiencia, un filtro de mangas y un ventilador. La investigación tomó como casos de estudio quince niveles diferentes de concentración de polvo introducidos en el sistema. Los resultados obtenidos mediante el modelo permitieron una mejor comprensión del comportamiento global del proceso de separación y clasificación de partículas finas.

En (Muñoz, 2013) se llevó a cabo una evaluación radiológica de los filtros de carbono y un análisis microbiológico de los filtros HEPA, con el objetivo de determinar su eficacia en entornos relacionados con la producción de radiofármacos. La eficiencia de los filtros de carbono fue evaluada mediante cinco mediciones aleatorias distribuidas a lo largo de cinco semanas, efectuadas tanto antes como después de cada emisión de radiación ionizante. El autor también destaca la necesidad de mantener condiciones estériles en la producción de productos farmacéuticos inyectables, lo cual requiere un control estricto de los filtros HEPA instalados en las áreas de purificación, a fin de asegurar la calidad e inocuidad de los compuestos fabricados. Los resultados obtenidos indican que los filtros de carbono alcanzaron una eficacia superior al 87 %, mientras que los filtros HEPA demostraron una eficiencia del 100 % en las condiciones evaluadas.

En Stephens (2013) hace referencia a investigaciones previas que abordan el procesamiento térmico de termoplásticos a temperaturas moderadamente elevadas —por ejemplo, temperaturas de boquilla entre $170\ ^\circ\text{C}$ y $240\ ^\circ\text{C}$ en equipos de extrusión industrial de gran escala—, en las cuales se ha observado la emisión tanto de partículas como de gases durante la operación (Contos et al., 1995; Unwin et al., 2012). En particular, se ha identificado que la descomposición térmica del ABS a temperaturas muy elevadas genera productos gaseosos como monóxido de carbono y cianuro de

hidrógeno, además de una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles. En el presente estudio, se llevaron a cabo mediciones en una oficina climatizada y amueblada de 45 m³, propiedad de una empresa dedicada a la educación, capacitación y comercialización de impresoras 3D para el público general. En este entorno se instalaron impresoras 3D de la marca Nine3D sobre mesas de trabajo. La operación simultánea de dos impresoras que utilizaban filamento PLA, junto con tres impresoras del mismo modelo funcionando con material ABS —que requiere una temperatura más alta—, provocó un aumento significativo en la concentración de partículas ultrafinas (UFP) en todas las gamas de tamaño evaluadas.

En (Alfredo Campos Trujillo*, 2015) se señala que las partículas menores a 10 micras (PM₁₀) representan un riesgo significativo para la salud, por lo que su monitoreo es fundamental. El método de alto volumen, respaldado por estudios colaborativos y el protocolo EPA IO.2.1, ha demostrado ser eficaz para medir PM₁₀ y partículas aún más pequeñas mediante el uso de cabezales específicos e impactadores de cascada.

En (Valera, 2016) se describe el uso de cámaras de burbujas en detectores diseñados para la búsqueda de materia oscura, los cuales incorporan sensores piezoeléctricos para registrar y diferenciar las señales acústicas generadas por la formación de burbujas. Estas burbujas se originan a partir de la interacción de partículas subatómicas con un fluido en estado sobrecalentado contenido dentro de la cámara. En el estudio se desarrolló un detector de partículas que integró sensores acústicos adheridos a las paredes externas del dispositivo. El sistema fue caracterizado mediante modelos teóricos, simulaciones y pruebas experimentales.

En (A. Davis, 2016) se analizó que las impresoras de modelado de deposición fundida (FDM), emiten gases volátiles y partículas que deterioran la calidad del aire interior. El autor habla que desarrolló un método para caracterizar y cuantificar las emisiones de una impresora 3D en funcionamiento, midiendo partículas finas y concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) a lo largo del tiempo utilizando una cámara de prueba de ambiente controlado. Todas las impresoras probadas emitieron partículas ultrafinas (UFP). Aproximadamente el 70% de las partículas liberadas por las impresoras tenían menos de 50 nm en diámetro. Los UFP emitidos aumentaron de tamaño con el tiempo al coagularse con otras partículas y la condensación de los vapores generados por la impresora. Las composiciones químicas de los gases liberados variaron dependiendo del material del filamento.

En (P. Azimi, 2016) se mencionó que las impresoras 3D de escritorio emiten una gran cantidad de partículas ultrafinas (UFP, partículas de menos de 100 nm) y algunos compuestos orgánicos volátiles (COV) peligrosos durante la impresión, aunque hasta la fecha se han probado muy pocas combinaciones de filamentos e impresoras 3D. en este artículo el autor cuantificó las emisiones de UFP y VOC especiados de cinco impresoras 3D de escritorio de extrusión de filamentos disponibles comercialmente que utilizan hasta nueve filamentos diferentes mediante experimentos controlados en una cámara de prueba. Los resultados de un análisis de detección de la exposición potencial a estos productos en un entorno típico de oficina pequeña sugirieron que se debe tener precaución al operar muchas de las combinaciones de impresora y filamento en espacios mal ventilados o sin la ayuda de sistemas combinados de filtración de gas y partículas.

En (K. L. Alvarez, 2016) se analiza la impresión 3D como un proceso de manufactura orientado a la producción de prototipos, componentes y piezas funcionales. Entre las técnicas más empleadas se destaca el Modelado por Deposición Fundida (FDM), debido a sus múltiples ventajas frente a otros métodos de fabricación. Por otra parte, el autor también reconoce que este tipo de tecnología presenta ciertos desafíos. Uno de los principales inconvenientes señalados está relacionado con la configuración del proceso de impresión, particularmente en lo referente a la selección adecuada de los parámetros de operación.

En (B.A.Garro Licón, 2017) se diseñó un sistema de detección de contaminantes basado en fluorescencia inducida por láser, permitiendo identificar sustancias sólidas y líquidas mediante la comparación entre señales de referencia y señales alteradas por interacción con el medio.

En (Laura Marcela Cardozo S., 2017) la autora describe distintas tecnologías de filtración, destacando los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) y los filtros ULPA (Ultra Low Penetration Air), ambos diseñados para capturar partículas extremadamente pequeñas suspendidas en el aire. El propósito del trabajo es proporcionar una visión general sobre la problemática de la contaminación del aire, sus implicaciones para la salud y las alternativas tecnológicas existentes para mitigar sus efectos.

En (T. L. Zontek, 2017) se caracterizaron las emisiones de partículas de dos impresoras 3D ampliamente utilizadas el precio los hace atractivos para empresas y consumidores. La importancia de la emisión de partículas ultrafinas está bajo creciente sospecha en su relación con efectos inflamatorios, pulmonares y cardiovasculares. Además, los estudios epidemiológicos han asociado

una mayor exposición a partículas y efectos adversos para la salud en aquellas personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares preexistentes. Debido a la emisión primaria de partículas de las impresoras 3D en la gama UFP con los efectos en la salud cada vez más asociados, este rango de tamaño es significativo para caracterizarlo en las impresoras 3D de escritorio. Las impresoras empleadas en este estudio utilizaron fabricación aditiva en la que un filamento de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) o ácido poliláctico (PLA) se alimenta a una velocidad constante, se extruye a una temperatura establecida y construye el objeto seleccionado capa por capa, en un plato calentado. La degradación oxidativa térmica del material del filamento durante el calentamiento y la extrusión libera una variedad de irritantes y toxinas sistémicas en pequeñas cantidades.

En (Q. Zhang, 2017) se planteó que las emisiones de partículas de las impresoras 3D de consumo de modelos de deposición fusionada múltiple se cuantifican sistemáticamente utilizando un protocolo de prueba de emisiones establecido (Blue Angel) para permitir evaluaciones de exposición cuantitativas para impresoras que operan en diferentes entornos. En sus pruebas obtuvieron datos consistentes con la generación de partículas por volatilización del filamento de polímero cuando es calentado por la extrusora. Debido a que es común que las impresoras 3D se utilizan a menudo en espacios públicos y residencias personales, el público en general y las poblaciones particularmente expuestas, como los niños, pueden estar expuestos a altas concentraciones de nanopartículas no manipuladas de potencial toxicidad.

En (S. Wojtyla, 2017) se habló que el rápido desarrollo de impresoras tridimensionales (3D) de escritorio de bajo costo ha hecho que esos dispositivos sean ampliamente accesibles para la fabricación de productos en el hogar. Sin embargo, los autores se preguntan, ¿es seguro? Se mencionó que los usuarios pueden minimizar los efectos o influencias de los contaminantes (compuestos orgánicos y partículas ultrafinas) generados por los dispositivos en cuestión. Dentro del alcance de este estudio, los autores intentaron investigar la descomposición térmica de los siguientes filamentos termoplásticos comúnmente utilizados y disponibles comercialmente: acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), tereftalato de polietileno (PET) y nilón. Los autores resumieron conocimiento teórico sobre la degradación térmica de los polímeros utilizados para las impresoras 3D y muestra los resultados de la investigación de los autores, además de presentar soluciones con miras al futuro que pueden aumentar la seguridad de la utilización de las impresoras 3D.

En (María G. Juarez Gutiérrez, 2019) se estudió el impacto ambiental de la impresión 3D, destacando su huella de carbono y la emisión de partículas ultrafinas que, en espacios confinados, pueden afectar la salud de los operadores.

En (Salthammer, 2019) se estudió la emisión de partículas ultrafinas y contaminantes gaseosos en la impresión 3D, analizando su composición química, volatilidad y distribución de tamaño. Se identificó que las partículas comenzaban a evaporarse desde los 150 °C y que, a 300 °C, solo el 25 % permanecía con un tamaño máximo de 11 nm.

En (Silva, 2020) se desarrolló Silva (2020) propuso un sistema de inyección para mejorar el empaquetado de filtros de aire y evaluó su integración con sensores para controlar la calidad del producto. El estudio destaca la importancia del diseño del material filtrante según el tamaño de las partículas y el cumplimiento de normativas internacionales de eficiencia de filtración.

1.9 MARCO TEÓRICO

1.9.1. Impresora 3D

La tecnología de impresión 3D nació de la necesidad de acelerar y mejorar los costos del proceso de creación de prototipos en el diseño industrial e ingeniería. Antes de su desarrollo, fabricar modelos físicos requería procesos complejos, costosos y que requerían más tiempo, como el mecanizado o el moldeado tradicional. Para resolver este problema, en la década de 1980 surgieron las primeras tecnologías de fabricación aditiva, entre ellas el modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling, FDM).

Este tipo de manufactura representa una alternativa eficiente y económica frente a técnicas convencionales como el control numérico computarizado y el modelado mecánico. Permite producir estructuras, herramientas y componentes altamente especializados con geometrías complejas, empleando una gran diversidad de materiales. El proceso se inicia mediante el diseño digital del modelo en un software de diseño asistido por computadora (CAD), que luego se exporta en formato STL (estereolitografía). Dicho archivo es procesado por el software de la impresora, el cual lo convierte en secciones. Estas capas serán impresas de forma secuencial hasta generar el objeto tridimensional.

Entre los métodos más comunes, el FDM se basa en la extrusión de un filamento termoplástico a través de una boquilla que se desplaza con precisión en los tres ejes del espacio. El material, que puede ser PLA, ABS u otros polímeros, se funde y deposita capa a capa, solidificándose casi de inmediato. Además de plásticos, esta tecnología permite el uso de materiales como ceras, metales, cerámicas, nylon, vidrio, e incluso sustancias alimenticias como el chocolate.

Otra técnica relevante es el sinterizado selectivo por láser (SLS), que emplea un láser para fundir de manera precisa sucesivas capas de polvo (metálico, cerámico, plástico o incluso biológico), formando así el objeto deseado. El material no fusionado puede ser recuperado para futuras impresiones. Esta técnica destaca por su alta resolución, alcanzando precisiones de entre 10 y 15 micras, y se utiliza ampliamente en sectores como la industria automotriz, la electrónica y la medicina, especialmente en la fabricación de componentes metálicos, baterías miniaturizadas y dispositivos implantables.[20]

1.9.2. Filamento PLA

El filamento PLA, o ácido poliláctico, es un polímero termoplástico derivado de recursos naturales como el maíz o la caña de azúcar. Es ampliamente utilizado en impresoras 3D con tecnología FDM debido a su facilidad de uso y popularidad, además de ser de menor costo en comparación con otros filamentos. Este material es soluble en agua, lo que permite emplearlo como soporte en impresiones y facilita su eliminación con un simple enjuague, siempre evitando el uso de disolventes. Su origen vegetal permite que el ácido láctico contenido se polimerice durante el proceso de fabricación. Además, al no provenir del petróleo, se considera una alternativa sostenible y reciclable, ideal para quienes buscan opciones más ecológicas en impresión 3D. [21]

1.9.3. Filamento ABS

El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un polímero termoplástico ampliamente empleado en impresión 3D mediante procesos de moldeo por inyección. Se trata de un material derivado del petróleo, caracterizado por su alta resistencia y durabilidad, aunque presenta menor sostenibilidad ambiental en comparación con el PLA, debido a su origen no renovable. Este filamento se distingue por su punto de fusión elevado y una vida útil prolongada, además de los retos a superar para una buena impresión. Por otro lado, soporta temperaturas altas durante su uso, lo que lo hace adecuado para aplicaciones exigentes. El ABS es comúnmente utilizado en la fabricación de componentes como juguetes, cascos, tuberías y partes de automóviles, ya que mantiene su integridad estructural incluso a temperaturas cercanas a los 100 °C, ofreciendo mayor flexibilidad y resistencia que los objetos impresos en PLA.[21]

1.9.4. Compuesto orgánico volátil

La Unión Europea (UE), bajo el esquema de "eco-denominación", define a los COVs como: "Cualquier componente orgánico que, a condiciones normales de presión, posee un punto de ebullición inicial menor o igual a 250 °C". Pero teniendo en cuenta la versión de la directiva de disolventes de la UE, se tiene: "Cualquier componente orgánico que a 20 °C tiene una presión de vapor mayor que 0.01 kPa, ó que tiene la correspondiente volatilidad bajo las condiciones particulares de uso" [22]. Esta perspectiva ha llevado a algunos investigadores a considerar la definición europea como una de las más accesibles. Así, integrando ambas versiones, se puede definir como: "Cualquier compuesto orgánico con un punto de ebullición menor a 250 °C y presión de vapor mayor que 0.01 kPa a 20 °C, es considerado un COV". [22]

Bajo la normativa mexicana, la definición gubernamental de COV es: "Cualquier material que se evapora a una temperatura de 155 °C en una hora". incluso líquidos comúnmente utilizados como plastificantes como el DOP (dioctil-ftalato), son considerados como COV por la legislación mexicana. [22]

1.9.5. Material particulado

Según el tamaño de sus partículas, los aerosoles atmosféricos pueden clasificarse en diversas categorías: nucleación, Aitken, acumulación, partículas finas y partículas gruesas. [23]

- El modo de nucleación: agrupa las partículas con diámetros inferiores a 25 nm. Estas se generan principalmente por la nucleación de gases precursores, en un proceso influenciado por factores como la concentración de estos gases, la presencia de aerosoles existentes, la humedad relativa y la temperatura. Aunque el tamaño mínimo no está claramente establecido, se estima entre 1 y 2 nm.
- El modo Aitken: incluye las partículas en el rango de diámetros de 25-100 nm. Normalmente se desarrollan a partir del crecimiento de partículas nucleadas, a través de mecanismos como la condensación y la coagulación.
- El modo de acumulación: corresponde a partículas con diámetros entre 0.1 y 1 micrómetro. Suelen formarse por la unión de partículas más pequeñas (coagulación) o por condensación de gases atmosféricos, particularmente en gotas de agua presentes en las nubes.
- El modo de partículas finas: esta categoría combina las partículas de los modos de nucleación y acumulación. Su origen se asocia a procesos de combustión o transformaciones de gases en partículas. Sus componentes más comunes incluyen metales, óxidos, carbono elemental o negro, compuestos orgánicos (tanto primarios como secundarios), sulfatos y nitratos.
- Partículas gruesas: comprenden aquellas con diámetros mayores a 1 μm , generadas principalmente por la fragmentación física de minerales, residuos orgánicos o materiales del suelo. También pueden contener sal marina y productos resultantes de reacciones químicas entre gases y partículas.
- Partículas ultrafinas (UFPs): son aquellas con un diámetro inferior a 0.1 μm . Además, en la normativa de calidad del aire en Europa se identifican categorías como PM_{2.5} y PM₁₀, que agrupan partículas con diámetros menores a 2.5 μm y 10 μm , respectivamente.

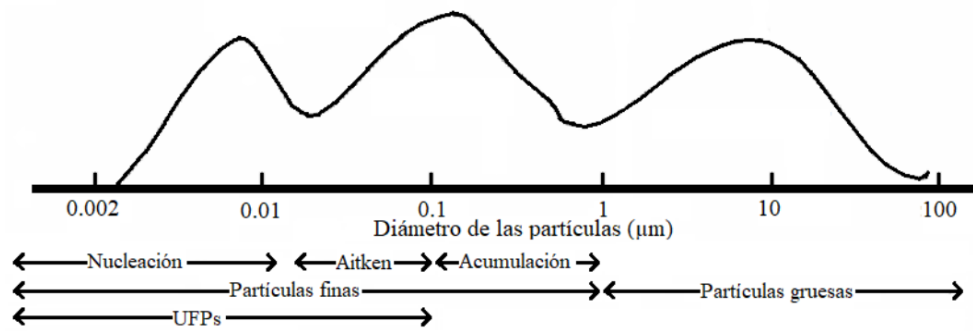


Figura 1. Esquema de distribución de tamaño de partículas.[23]

1.9.6. Mecanismos de filtración

- **Intercepción:** Las partículas transportadas por el flujo de gas siguen sus líneas de corriente. Si una partícula se encuentra dentro del alcance de una fibra del filtro, queda atrapada al entrar en contacto con ella. Este mecanismo es más eficaz para partículas de tamaño intermedio, típicamente entre 0,1 y 1 micrómetro, que no son lo suficientemente pequeñas como para seguir el flujo difusamente, pero tampoco tan grandes como para actuar por sedimentación.
- **Impactación inercial:** Partículas con masa no logran seguir cambios en el flujo y chocan contra las fibras.
- **Sedimentación gravitacional:** Partículas grandes caen por gravedad y se depositan en el filtro. Este principio afecta a las partículas más grandes, generalmente superiores a 10 μm .
- **Difusión:** Partículas muy pequeñas se mueven de forma errática (movimiento browniano) y terminan adheridas a las fibras. Este mecanismo afecta más profundamente a partículas de menor tamaño, sobre todo las que miden menos de 0,1 μm .
- **Atracción electrostática:** Filtros con carga eléctrica atraen partículas cargadas o inducen dipolos en partículas neutras. [24]

1.9.7. Tipos de filtración

Hay dos tipos de filtros para bacterias/virus disponibles para la filtración de gases respirados:

- **Filtros mecánicos:** Están formados por una lamina de fibra de vidrio empaquetada densamente, la cual esta unida por resina. Es gracias a la alta densidad de las fibras que cuenta con una alta resistencia al flujo de aire por unidad de área la cual se ve disminuida por la adición de una lamina

de fibra de vidrio con una gran área de superficie, con el propósito de disminuir la resistencia a un nivel aceptable.

- Filtros electrostáticos: Este tipo de filtros emplean una lámina plana compuesta por fibras como medio de barrera. A diferencia de los filtros de fibra de vidrio, los electrostáticos tienen una menor densidad de fibra, lo que se traduce en una resistencia más baja al paso del aire por cada unidad de área. Su eficiencia de filtrado mejora gracias a la incorporación de un material con carga eléctrica, que atrae y retiene las partículas que lo atraviesan.[24]

1.9.8. Sensor de gas Figaro TGS2620

La serie Figaro 2600 es un tipo de sensor de gas serigrafiado; semiconductor de óxido metálico de película gruesa que ofrece miniaturización y menor consumo de energía. El TGS2620 muestra una alta selectividad y sensibilidad a los vapores orgánicos volátiles como etanol, metanol, etc.

El sensor se imprime sobre dos electrodos que se han impreso sobre un sustrato de alúmina. Un electrodo está conectado al pin 2 y el otro al pin 3. El elemento del sensor que se calienta se encuentra en la parte inferior del sustrato; está conectado a los pines 1 y 4.[19]

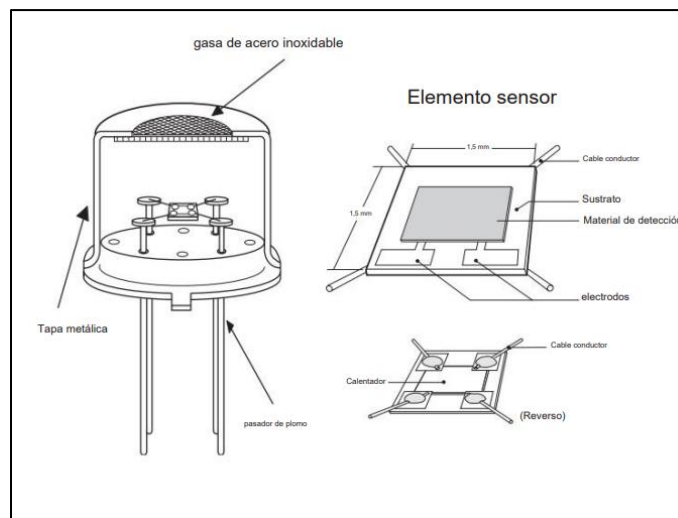


Figura 2. Estructura del sensor.

Información básica y especificaciones:

Características:

- Alta selectividad a vapores orgánicos volátiles.
- Bajo consumo de energía.
- Tamaño pequeño.
- Larga vida.

Aplicaciones:

- Alcohóímetros.
- Detectores/ alarmas de vapor orgánico.
- Detectores de solventes para fábricas, tintorerías e industrias de semiconductores.

CAPÍTULO 2. APLICACIÓN EXPERIMENTAL

RESUMEN DE CAPÍTULO

En esta sección se describe la parte de la aplicación de la metodología, siguiendo los pasos y proceso utilizados para llevar a cabo el diseño e implementación desde las primeras etapas, incluyendo la fase de simulación hasta la manufactura de un prototipo físico describiendo la instrumentación propuesta.

2.1. Simulación de flujo de aire

Como primer punto se consideró iniciar el proceso de llevar a cabo simulaciones de elemento finito para obtener información acerca del flujo de aire dentro de la cabina de impresión diseñada.

Para llevar a cabo el diseño de la cabina se consideraron las dimensiones reales de la impresora Creality Ender 3.

Dimensión	mm
Altura máxima (sin soporte)	480
Longitud A	437
Longitud B	400

Figura 3. Tabla con dimensiones de impresora 3D.

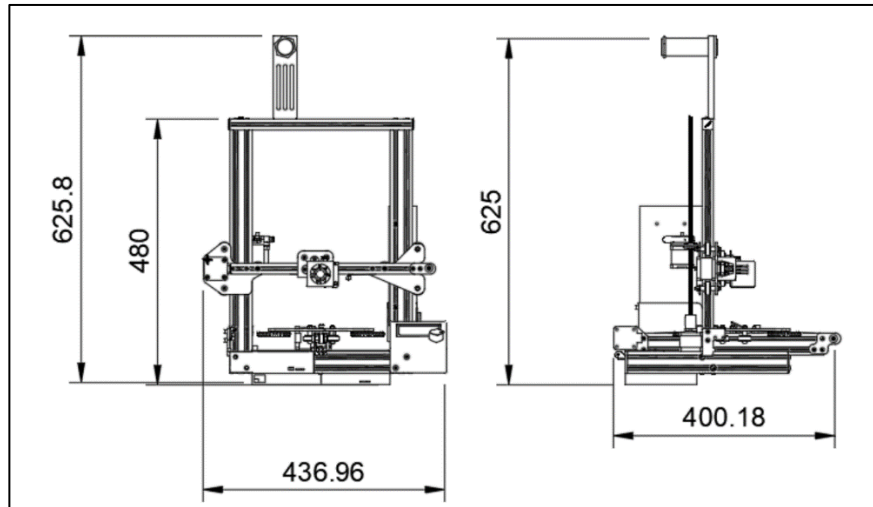


Figura 4. Dimensiones de impresora 3D Creality Ender 3.

Con fines de reducir espacio se optó por retirar la parte superior correspondiente al soporte del carrete de filamento para colocarlo de manera externa a la cabina, dejando la altura máxima de la impresora no mayor al marco superior.

Se llevo a cabo el diseño por modelaje 3D de una cabina cuadrada cuyas dimensiones corresponden a los 600 mm por lado, esto considerando el desplazamiento de la impresora en sus diferentes ejes.

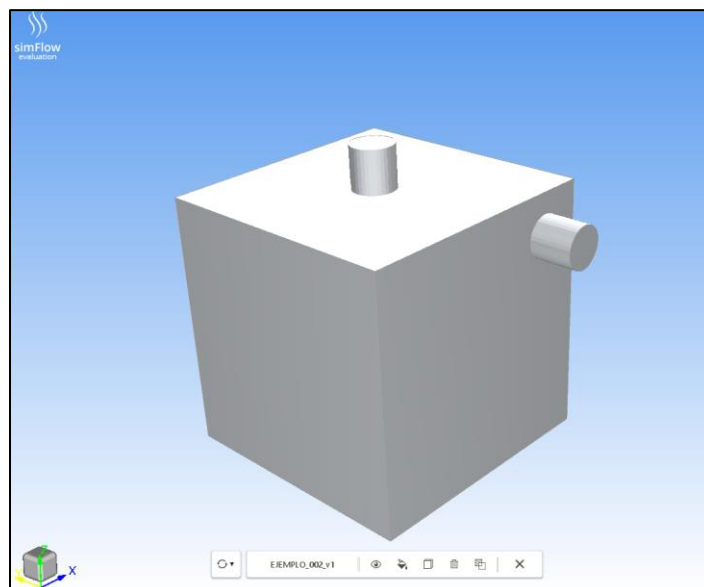


Figura 5. Diseño 3D cabina.

Mediante el software SimFlow 4.0 se le aplicó una malla para el análisis de elemento finito, en conjunto con una serie de configuraciones para ajustar las propiedades de la entrada y salida del flujo, así como también del material que va circular, y el modelo matemático en que se va basar.

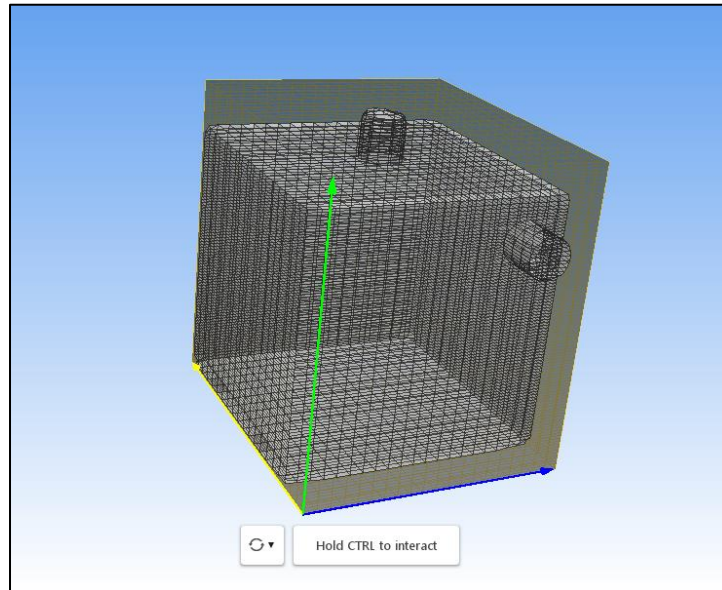


Figura 6. Enmallado de cabina en SimFlow.

Tras haber realizado un posprocesamiento de los datos de la simulación se obtuvieron imágenes como las siguientes:

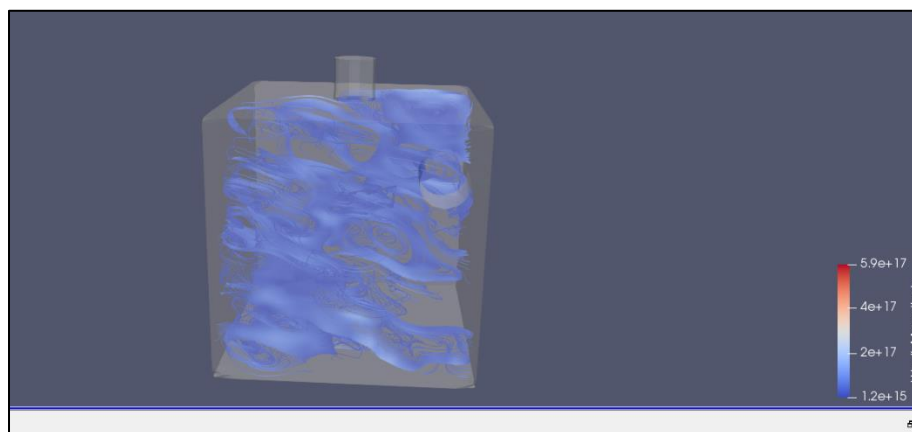


Figura 7. Simulación sin impresora.

En la imagen de arriba podemos ver el comportamiento del flujo dentro de la cabina al aplicarle 1.225 kg de aire en un intervalo de 5 segundos.

Siguiendo el mismo procedimiento de simulación, ahora se ha considerado que la impresora interna de la cabina representa un obstáculo para la circulación de aire.

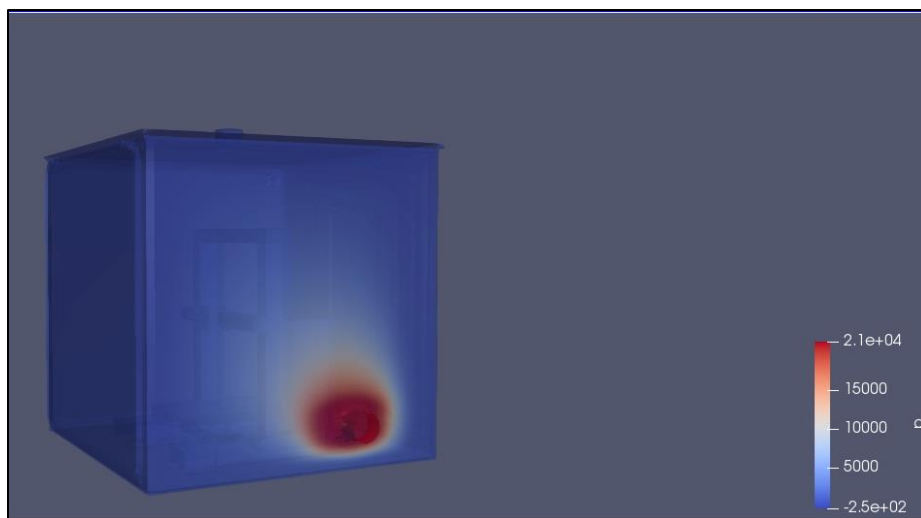


Figura 8. Simulación con impresora.

2.2. Construcción de la estructura de la cabina.

Se tomaron las medidas correctas para que la impresora tuviera la libertad de movimiento dentro de la cámara, por lo tanto, se cortaron 12 tubos 1" de aluminio de 600mm x 600mm. Enseguida se cortaron 20 piezas de ángulo de aluminio 1" 600mm x 600mm con un corte en 45° en cada esquina por pies.

Una vez unidos los tubos, se unieron 4 ángulos por cada cara del cubo que forma la cámara excepto la cara de la tapa, por medio de perforaciones y remaches se mantiene unidas las piezas.



Figura 9. Chasis de la cabina.

Teniendo el chasis listo se procede a cortar 4 policarbonatos en forma de cuadrados de 600mm x 600 mm.



Figura 10. Cabina con tapas de policarbonato.

Unidad	Marca	Producto	Precio	Subtotal
4	VINILOS	Polycarbonato 600mm X 600mm	\$50.00	\$200.00
3	GALGO	Hule aislante 1"	\$35.00	\$105.00
1	S/M	Lampara LED 25W	\$50.00	\$50.00
8	S/M	Imanes de neodimio 10mm x 3mm	\$10.00	\$80.00
2	ARCOS	Aluminio Tubo 1" natural	\$180.00	\$360.00
2	ARCOS	Aluminio Angulo 1" natural	\$150.00	\$300.00
1	Home Depot	Triplay 600mm x 600mm	\$50.00	\$50.00
1	Home Depot	MDF	\$50.00	\$50.00
10	TESLA	Manguera flexible	\$5.00	\$50.00
			TOTAL	\$1245.00

Figura 11. Tabla de materiales para la estructura.

2.3. Filtro

Para la parte de la filtración del aire partimos de un filtro HEPA H13 de tres capas con estructura cilíndrica. Cuyas dimensiones son 80 mm de alto por 60 mm de diámetro exterior.



Figura 12. Imagen de filtro HEPA.

Se diseñó un soporte para fijar el filtro a la estructura de extracción de aire y al mismo tiempo dirigir el aire extraído a pasar por las paredes del filtro HEPA. Para ello nos apoyamos en software Autodesk fusion. Se obtuvieron 3 modelos, para la sujeción del cilindro a una rosca de mayores dimensiones que hace la función de coplee a la salida de un extractor de aire AC.

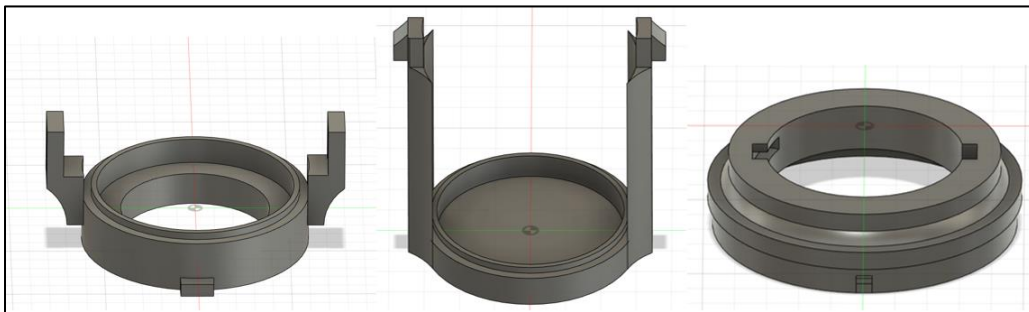


Figura 13. Soporte diseñado para filtro HEPA.

Se llevó a cabo la impresión del diseño en una impresora Ender 3 con filamento PLA, dimensiones de 1:1, con una densidad de relleno del 100%.



Figura 14. Impresión 3D de soporte del filtro.

2.4. Desarrollo de la parte electrónica

2.4.1. Sensor de gas

Para las necesidades de este proyecto se decidió el uso del sensor TGS2620 de la empresa Figaro. El cual utiliza un material semiconductor de óxido de estaño (SnO_2)[19] que cambia su resistencia cuando entra en contacto con ciertos gases. La resistencia del material disminuye en presencia de VOCs, lo que se traduce en una señal eléctrica que puede interpretarse como una medida de concentración de gas. [19]

El sensor proporciona una señal de salida analógica proporcional a la concentración de gas detectado, esto nos permite una fácil integración con microcontroladores o sistemas de adquisición de datos para monitoreo continuo. [19]

Algunas consideraciones eléctricas:

Parámetro	Valor
Voltaje en RH	5 VDC
Voltaje del circuito	5 VDC
Corriente en RH	42 mA $\pm$ 4mA
Resistencia en el calentador (RH)	83 Ω (real 77 Ω)
Resistencia del sensor (RS)	1k Ω ~ 5k Ω

Figura 15. Especificaciones eléctricas de sensor TGS2620.

Se aplicó una conexión básica formada por un divisor de tensión, tomando en cuenta que es un sensor resistivo. Donde nuestro voltaje de interés se encuentra sobre la resistencia de carga (R_L), el cual dependerá en función de la variación que se presente en la resistencia interna del sensor. (R_S).

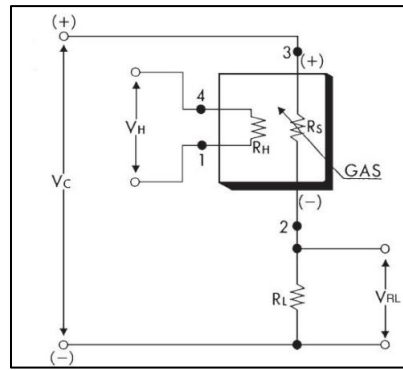


Figura 16. Circuito básico con TGS2620.

Resulta importante mencionar que el voltaje del calentador es crucial para el funcionamiento del sensor, se requiere un voltaje específico para el calentador y mantener la temperatura de operación adecuada y garantizar su sensibilidad a los gases.

Se realizaron algunas modificaciones al circuito para poder obtener mejores resultados en las mediciones y llevar a cabo cambios desde la interfaz sin recurrir a ajustes en hardware.

2.4.1.1. Convertidor PWM a voltaje analógico

Primero estableceremos como paso necesario de nuestra propuesta para el sistema electrónico del sensado, el diseño de un convertidor de una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) a una señal de voltaje analógico de nivel constante que sirva como referencia para un espejo de corriente. Esto nos da la posibilidad de obtener una fuente de corriente variable dependiente del ciclo de trabajo de una señal PWM.

El convertidor PWM a voltaje analógico se basa en la transformación de la señal que oscila rápidamente entre dos niveles (estado alto y estado bajo) a un valor promedio a lo largo del tiempo dependiente del ciclo de trabajo de la señal PWM, para lograr esto se emplea un filtro RC de baja frecuencia.

Para esta propuesta se ha empleado un filtro activo de segundo orden de topología Sallen-Key con aproximación de Butterworth. La configuración de segundo orden nos brinda una atenuación más

pronunciada de las frecuencias posteriores a la frecuencia de corte además que esta topología es muy común para realizar filtros activos que ofrecen una buena estabilidad y respuesta en frecuencia. Se ha seleccionado la aproximación Butterworth ya que se caracteriza por tener una respuesta de amplitud plana en la banda de paso y una atenuación progresiva en la banda de rechazo.[26]

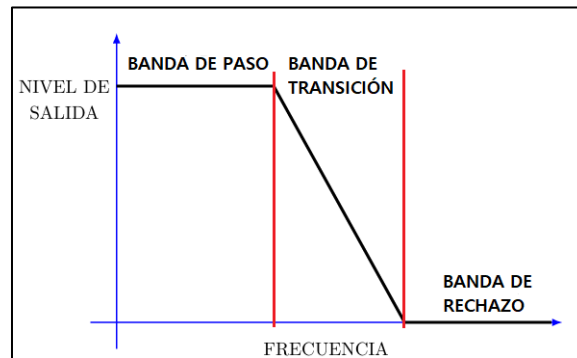


Figura 17. Características del dominio de frecuencia de un filtro pasa bajas.

En la figura de arriba podemos observar la respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajas y las regiones que lo componen. Para realizar el convertidor se debe tener en cuenta que el punto de operación se encuentra pasando la frecuencia de corte dado se busca atenuar los cambios de estado de la señal PWM. Para ello se establece que la frecuencia del PWM sea en gran medida superior a la de corte, esto permitirá que el filtro atenúe las variaciones rápidas de la señal PWM y genere un voltaje analógico estable en la salida.

Hemos establecido algunas consideraciones de inicio para el desarrollo de nuestro filtro pasa bajas Butterworth.

Parámetro	Valor
Frecuencia de corte (FC)	100 Hz
Factor de calidad (Q)	0.7071
Constante (K)	1.0
Capacitor 1(C1)	10Nf

Figura 18. Valores propuestos para filtro pasa bajas.

A continuación, se muestra el diagrama del filtro pasa bajas de topología Sallen-Key. Se propuso $C1 = 10nF$ y $R1 = R2 = R$.

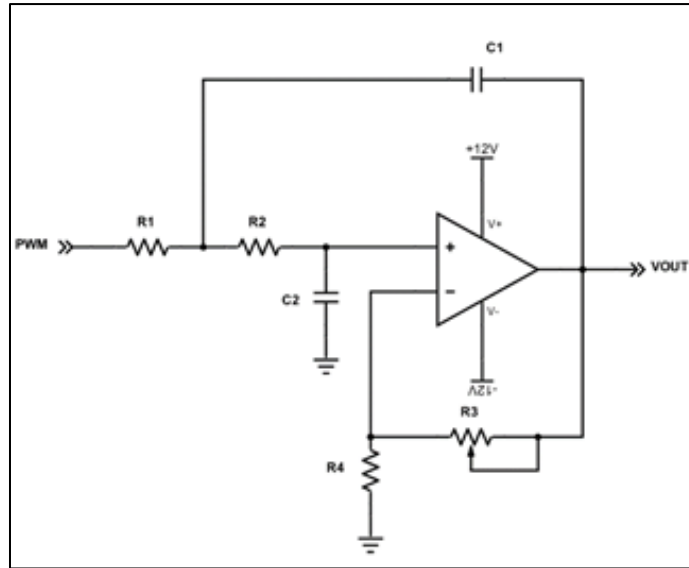


Figura 19. Filtro pasa bajas Sallen-Key de segundo orden.

Ecuación 1.
$$m = \frac{1 + \sqrt{(1 + 8Q^2(A-1))}}{4Q}$$

Ecuación 2.
$$R = \frac{1}{2\pi K f_{cm} C1}$$

Ecuación 3
$$R4 = \frac{2AR}{A-1}$$

Ecuación 4
$$R3 = 2AR$$

Ecuación 5
$$C2 = m^2 C1$$

Para ecuación, sustituimos valores:

$$m = \frac{1 + \sqrt{(1 + 8(0.7071)^2((3) - 1))}}{4(0.7071)} = 1.4142$$

Empleando el valor de C1 propuesto se obtiene el valor de R:

$$R = \frac{1}{2\pi(1)(100)(1.4142)(10 \times 10^{-9})} = 112.539K\Omega \approx 112K\Omega$$

Hallamos los valores para R3 Y R4 sustituyendo R en ecuación 3 y 4:

$$R4 = \frac{2(3)(112.539K\Omega)}{(3)-1} = 337.61 K\Omega$$

$$R3 = 2(3)(112.539K\Omega) = 675.23 K\Omega$$

Por último, encontramos el valor de C2 aplicando ecuación 5:

$$C2 = (1.4142)((10 \times 10^{-9}) = 10nF$$

Contando con todos los valores de los elementos que conforman el filtro de pasa bajas podemos obtener la respuesta en frecuencia de nuestro filtro, para ellos es necesario obtener la función de transferencia, la cual es una herramienta matemática que describe cómo un sistema lineal e invariante en el tiempo responde a una entrada para producir una salida. Lo que supone una ventaja para analizar y predecir el comportamiento del sistema sin tener que resolver las ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo. La siguiente ecuación expresa la estructura para la función de transferencia en términos de componentes (resistencias y capacitores) para nuestro filtro de topología Sallen-Key.[26]

$$\text{Ecuación 6} \quad \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + \frac{R3}{R4})(\frac{1}{C1C2R1R2})}{s^2 + s(\frac{1}{C1R2} + \frac{1}{C1R1} + \frac{1-A}{C2R2R4}) + (\frac{1}{C1C2R1R2})}$$

Tomando en cuenta que R1=R2=R:

$$\text{Ecuación 7} \quad \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + \frac{R3}{R4})(\frac{1}{C1C2R^2})}{s^2 + s[\frac{1}{R}(\frac{2}{C1}) + \frac{1-A}{C2R}] + (\frac{1}{C1C2R^2})}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 7:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + \frac{680 \times 10^3}{330 \times 10^3})(\frac{1}{(10 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})(12.544 \times 10^9)})}{s^2 + s[\frac{1}{(112 \times 10^3)}(\frac{2}{(10 \times 10^{-9})}) + \frac{1-3}{(20 \times 10^{-9})(112 \times 10^3)}] + (\frac{1}{(10 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})(12.544 \times 10^9)})}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{(3.0606)(398.596 \times 10^3)}{s^2 + s[(8.928 \times 10^{-6})(200 \times 10^6) - (892.8571)] + (398.596 \times 10^3)}$$

$$\text{Ecuación 8} \quad \frac{v_o}{v_i} = \frac{1.2199 \times 10^6}{s^2 + s(892.7429) + (398.596 \times 10^3)}$$

Como se había mencionado la función de transferencia es la relación entre la transformada de Laplace de la salida y la entrada del sistema. Al evaluar la función de transferencia en términos de frecuencia podemos conocer cómo el sistema amplifica o atenúa diferentes frecuencias. En la ecuación 8 se representa función de transferencia del filtro pasa bajas de segundo orden de aproximación de Butterworth con frecuencia de corte en 100Hz.

Analizar los polos y ceros de un filtro pasa bajas es importante para entender y diseñar su respuesta en frecuencia.

Los ceros son los valores de frecuencia en el dominio de Laplace donde la ganancia del sistema se hace cero. Por otro lado, los polos son los valores de frecuencia donde la ganancia del sistema tiende a infinito.

Hablando de un filtro con respuesta de pasa bajas, no existen ceros finitos, ya que el numerador de la función de transferencia es un valor constante independiente de S . Los polos están dados por los valores de S que hacen cero el denominador.

Para calcular polos de la ecuación 8:

Ecuación 9 $S^2 + 892.85S + 398596.9388 = 0$

Apoyándonos de la fórmula general cuadrática para resolver ecuaciones de la forma:

Ecuación 10 $ax^2 + bx + c = 0$

Ecuación 11 $X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

Donde a , b y c son los coeficientes de la ecuación cuadrática.

Sustituyendo valores en ecuación 11:

$$X_{1,2} = \frac{-(892.85) \pm \sqrt{(892.85)^2 - 4(1)(398596.9388)}}{2(1)}$$

$$X_1 = \frac{892.85}{2} + i \frac{\sqrt{797206.6327}}{2}$$

$$X_2 = \frac{892.85}{2} - i \frac{\sqrt{797206.6327}}{2}$$

Ecuación 12 $X_1 = 446.425 + i446.4321$

Ecuación 13 $X_2 = 446.425 - i446.4321$

La ubicación de los polos y ceros en el plano complejo nos permite determinar si el sistema es estable o inestable. Para un sistema estable todos los polos deben estar en el semiplano izquierdo (parte real negativa). Apoyándonos del software MATLAB es posible la ver la ubicación de los polos que previamente calculamos.

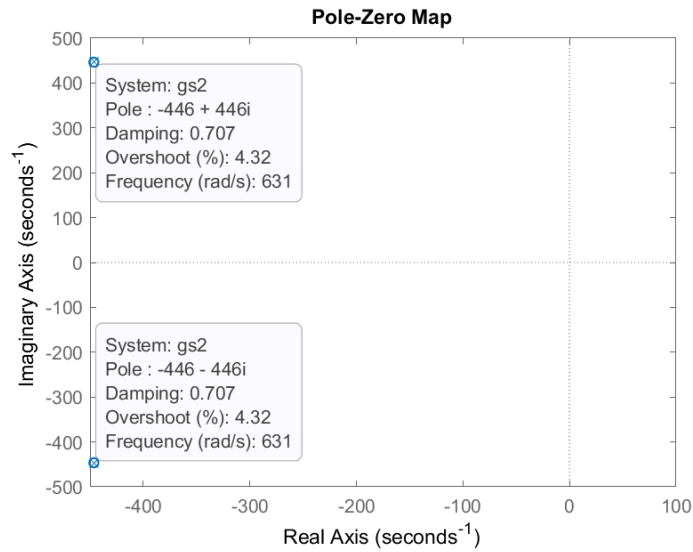


Figura 20. Diagrama polo-zero de ecuación 8.

Como se observa en la figura de arriba, tenemos polos complejos conjugados correspondientes a la ecuación 12 y 13. Partiendo de lo anterior notamos como la ubicación de los polos está sujeto a el factor de calidad(Q), el cual afecta el ancho de banda de la banda de transición. Nuestro valor de Q está fijado a un valor de 0.7071 para guardar la relación de la aproximación máximamente plana (Butterworth). Esto quiere decir que el factor de calidad determinó la ubicación de los polos para garantizar una ganancia constante en la banda de paso, permitiendo una transición de atenuación más pronunciada sin comprometer la banda de paso.[26]

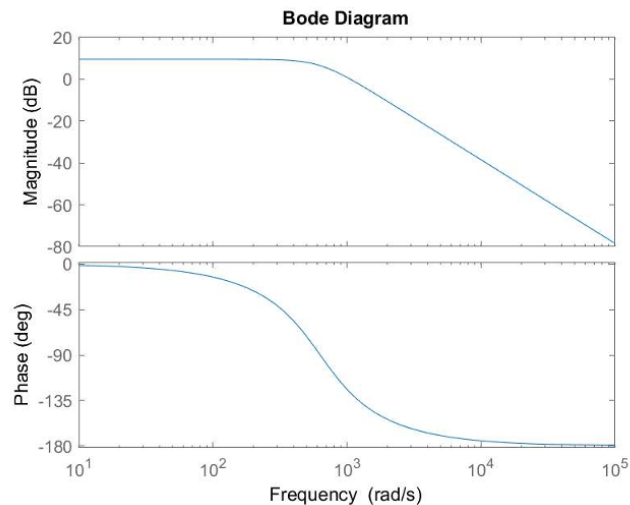


Figura 21. Diagrama de Bode de función de transferencia del filtro pasa bajas.

Para este caso de un filtro de segundo orden, tenemos una pendiente de atenuación de -40dB por década. Aunque cabe mencionar que existen valores de aproximaciones que generan más oscilación en la frecuencia de corte obteniendo una banda de transición más pronunciada, pero comprometiéndolo su estabilidad en las frecuencias de la banda de paso.

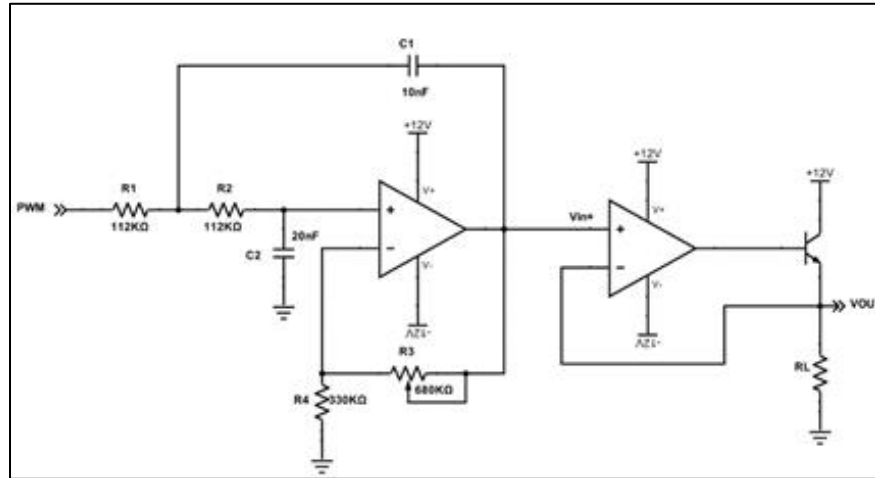


Figura 22. Circuito esquemático del convertidor de voltaje a corriente y la fuente de corriente.

En la figura 22, se observa el diagrama completo del convertidor con la adición de una fuente de corriente constante ajustada por voltaje empleando un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje, cuya salida conecta con la base de un transistor de potencia y el lazo de retroalimentación a el emisor del mismo transistor.

Ecuación 14
$$V_{OUT} = V_o - V_{BE}$$

Para obtener:

Ecuación 15
$$I_E = \frac{V_o - V_{BE}}{R_L}$$

Donde V_o es el voltaje de salida del segundo operacional, V_{BE} es el voltaje base-emisor del transistor y R_L la resistencia de carga.[25]

2.4.1.2. Espejo de corriente

Dando continuidad a la importancia de la temperatura de operación del sensor, se propuso emplear un espejo de corriente para replicar una corriente de referencia sobre otra rama del circuito donde se encuentre la resistencia del calentador del sensor, esto para mantener una corriente constante del valor adecuado manteniendo las especificaciones de la hoja de datos para un buen funcionamiento. Por otra parte, siguiendo la idea del convertidor de PWM a voltaje analógico, al

poder cambiar el nivel del voltaje mediante el ciclo de trabajo, esto nos brinda la capacidad de cambiar la corriente de referencia del espejo de corriente y al mismo tiempo la temperatura del sensor.

Para poder garantizar su funcionamiento óptimo, este tipo de sensor de oxido metálico utiliza un ciclo de regeneración térmica, también conocido como "limpieza" o "purga", que ayuda a recuperar su sensibilidad después de estar expuesto a altos niveles de gas. La empresa Figaro no especifica una temperatura exacta para el sensor TGS2620, ya que el proceso depende de diferentes factores, así como también de la aplicación, el entorno y los niveles de gas a los que ha sido expuesto.

Para alcanzar el proceso de regeneración es necesario elevar la temperatura por un tiempo corto y regresar a su temperatura normal.

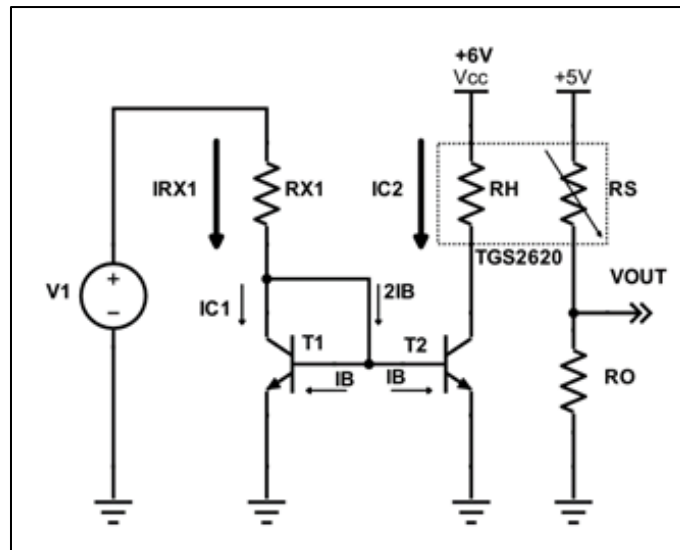


Figura 23. Circuito esquemático de circuito de variación de temperatura en sensor de gas.

En la figura de arriba se observa el circuito esquemático correspondiente al espejo de corriente de configuración sencilla compuesto por dos transistores BJT(BD135) donde la fuente V1 representa el valor del voltaje analógico proporcionado el convertidor PWM y siendo IC2 nuestra corriente de interés.

Análisis en corriente directa:

$$Q1 = Q2$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \gg 1$$

Donde β_1 y β_2 corresponden al factor de amplificación de Q1 y Q2 respectivamente.

Teniendo en cuenta que para un transistor BJT la relación entre la corriente de base y la corriente de colector es la siguiente:

$$I_c = I_b (\beta) \rightarrow I_b = \left(\frac{I_c}{\beta}\right)$$

Por leyes de voltaje de Kirchhoff:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 16} \quad I_{RX1} &= I_{B1} + I_{B2} + I_{C1} \\ I_{B1} &= I_{B2} = I_B \end{aligned}$$

Por tanto:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$\text{Ecuación 17} \quad I_{RX1} = 2I_B + I_C$$

Sustituyendo valores para I_B :

$$\text{Ecuación 18} \quad I_{RX1} = 2\left(\frac{I_C}{\beta}\right) + I_C \rightarrow I_{RX1} = I_C \left(\frac{2}{\beta} + 1\right)$$

De esta manera obtenemos la relación entre la corriente I_{RX1} y la corriente de colector (I_C).

$$\text{Ecuación 19} \quad I_C = \frac{I_{RX1}}{\left(\frac{2}{\beta} + 1\right)}$$

Como $\beta \gg 1$:

$$\text{Ecuación 20} \quad \therefore I_{RX1} \approx I_C = I_{C2}$$

Aplicando LVK:

$$\text{Ecuación 21} \quad I_{RX1} = \frac{V_1 - V_{BE1}}{R_X}$$

Partiendo de la ecuación 20, podemos observar que la corriente de colector y su aproximación a la corriente que circula por R_X depende del valor de β . A un mayor valor para el factor de amplificación la desviación entre dichas corrientes se estrecha, para nuestro caso β de los transistores BD135 se encuentra rondado el valor de 230. Dicho lo anterior la corriente que circule por R_X se vería reflejada en la resistencia R_H , fijando su valor sin importar que sean de diferentes impedancias o niveles de voltaje, claro sin exentar limitaciones descritas por la ley de Ohm.

De esta forma podemos asegurar que la corriente de en el calefactor está en función de la resistencia de control, R_X .

Se propone $R_X = 180\Omega$, sabiendo los siguientes datos:

$V_1 = 10.2 \text{ V}$, como voltaje máximo del convertido PWM a analógico.

$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ siendo el voltaje de polarización del diodo en el transistor.

Aplicando la ecuación 21:

$$I_{RX1} = \frac{V_1 - V_{BE1}}{R_X} = \frac{10.2 - 0.7}{180} = 52.77 \text{ mA}$$

Siendo el resultado el valor máximo de corriente sobre R_X y en condiciones ideales la misma que se establecerá sobre la resistencia del calefactor.

2.4.1.3. Sensor de corriente para calefactor del sensor

Una vez abordado el espejo de corriente, se propuso dotarle al sistema la capacidad de monitorear el valor de corriente eléctrica que circula a través de la resistencia calefactora (R_H) del sensor de gas (TGS2620) y mostrar su valor en una interfaz visual.

Al revisar diferentes propuestas se optó por el integrado INA219, el cual es un sensor de corriente, voltaje y potencia, que está basado en un amplificador de instrumentación para medir el voltaje que pasa a través de una resistencia de derivación (R_D). Para lograr esto, el INA219 mide la diferencia de voltaje que hay en la resistencia y es amplificado para posteriormente ser enviado a un convertidor analógico- digital de 12 bits localizado internamente.

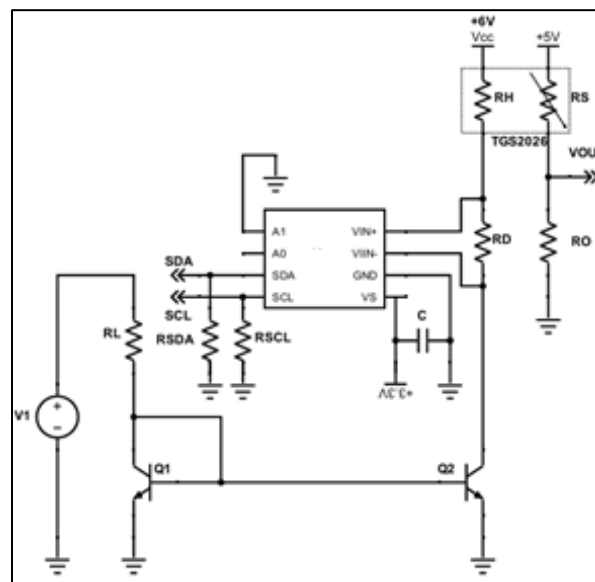


Figura 24. Circuito esquemático para sensado de corriente en resistencia calefactora del sensor de gas.

Una vez convertido dicho voltaje diferencial a una señal digital, es posible procesar dicha información por un microcontrolador o microprocesador apoyándose de la ley de Ohm.

Ecuación 22
$$IRD = \frac{VRD}{RD}$$

Donde R_D es la resistencia de derivación establecida en un valor de 0.1Ω . I_{RD} es la corriente que circula por la resistencia de derivación y está en función de la corriente de colector de Q2. V_{RD} es la diferencia de voltaje en R_D a medir por el sensor.

2.4.1.4. Preacondicionamiento de señal de salida (restador de voltaje).

Antes de llegar un módulo de escalamiento de voltaje se propuso ajustar el valor de voltaje de salida del sensor a un valor conveniente para que el escalamiento de la señal sea más fácil. Para ello se hizo uso de un restador voltaje conformado por un amplificador operacional y un arreglo de resistencias.

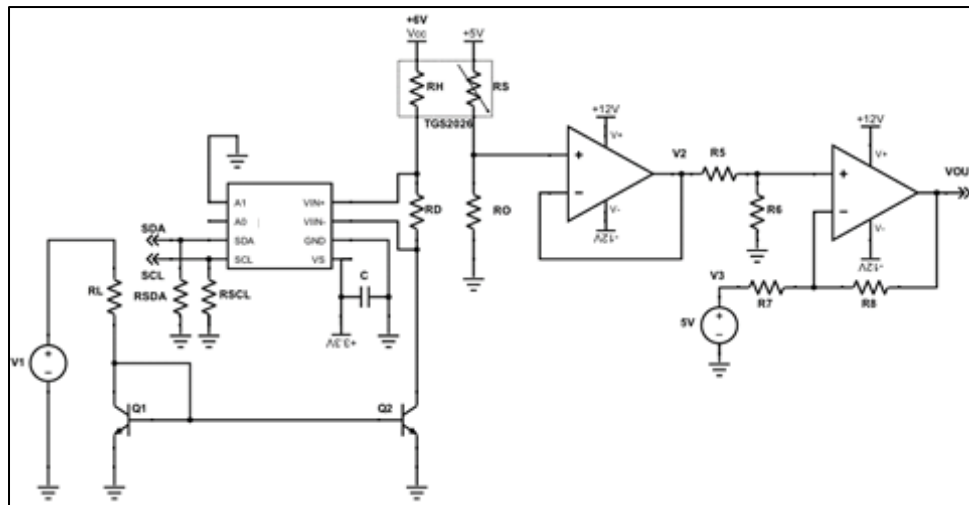


Figura 25. Circuito esquemático del sensor salida del sensor de gas a un restador.

En la figura 25, es el circuito esquemático del espejo de corriente al cual se le agrego un restador de voltaje en la resistencia de carga del sensor (R_O). Haciendo una observación en el divisor de tensión del voltaje de salida del sensor hacemos el comentario que el valor de R_S depende de la temperatura y la exposición a el gas, variando entre $1K\Omega \sim 5K\Omega$. De la misma manera el valor de R_O es un valor recomendado en la hoja de datos del mismo sensor, asignado a un valor de $10K\Omega$, lo que nos indica que R_O consume gran porcentaje del voltaje en relación a R_S .

Teniendo en cuenta lo anterior, nuestro voltaje de interés siempre se encuentra por encima del 66% de la fuente de ese divisor de tensión, dificultando el ajuste del siguiente bloque de acondicionamiento, lo que nos llevó a disminuir dicho nivel apoyándonos de un restador de voltaje.

El voltaje de salida este dado por:

Ecuación 23
$$V_{OUT} = \left(\frac{R_8}{R_7} + 1 \right) \frac{R_6}{R_6 + R_5} V_2 - \frac{R_8}{R_7} V_3$$

Estableciendo que $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R$

$$V_{OUT} = \left(\frac{R}{R} + 1 \right) \frac{R}{R + R} V_2 - \frac{R}{R} V_3$$

Ecuación 24
$$V_{OUT} = V_2 - V_3$$

En la ecuación 24, tenemos el voltaje de salida del restador de ganancia unitaria.

Continuamos con la ejecución de un diseño de circuito impreso para el sensor de gas, teniendo en cuenta las dimensiones de los componentes.

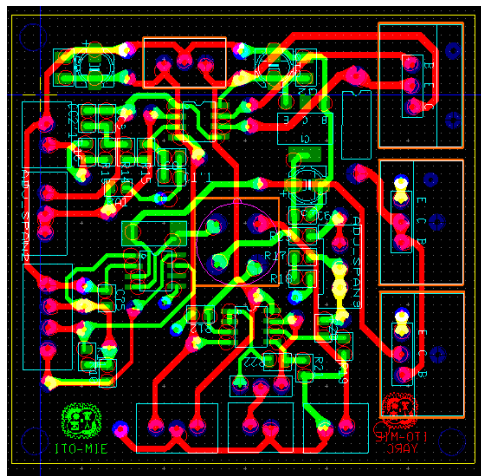


Figura 26. Diseño PCB para sensor de gas.

Una vez que el diseño está listo para ser llevado a manufactura se empleó el método de transferencia de tinta sobre una placa de cobre de doble cara, seguido por un ataque químico para el revelado y aplicación de mascara antisoldante.

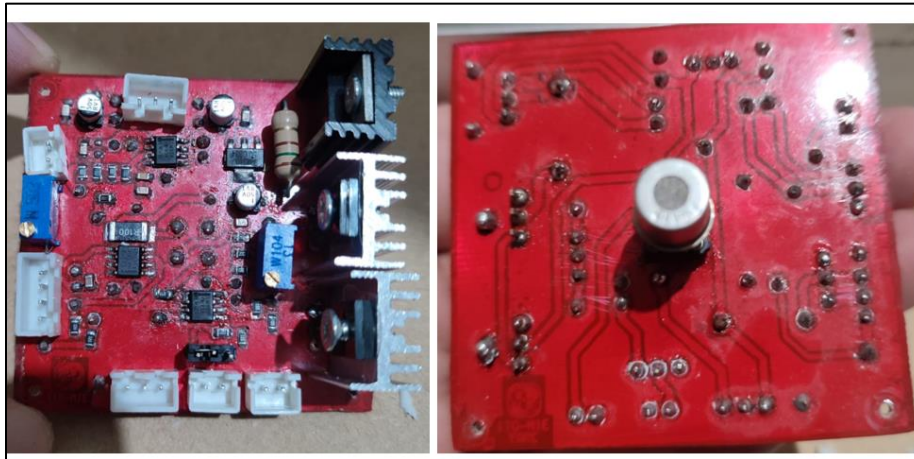


Figura 27. Circuito impreso manufacturado para sensor de gas.

2.4.2. Escalador de voltaje

El voltaje obtenido del sensor corresponde a una señal analógica que varía en función de la concentración de gas. Para poder interpretar esa señal con la tarjeta de desarrollo que hemos escogido, una Raspberry pi 4 model B, resulta necesario acondicionarla antes de llegar a un ADC para una mejor interpretación. Para ello se hace empleo de un circuito escalador de voltaje que nos permite tomar el voltaje de la placa del sensor y ajustar sus valores a conveniencia y necesidad. La tarjeta Raspberry pi 4, maneja valores de voltaje de 3.3 volts limitados a 50 mA en sus pines de propósito general.

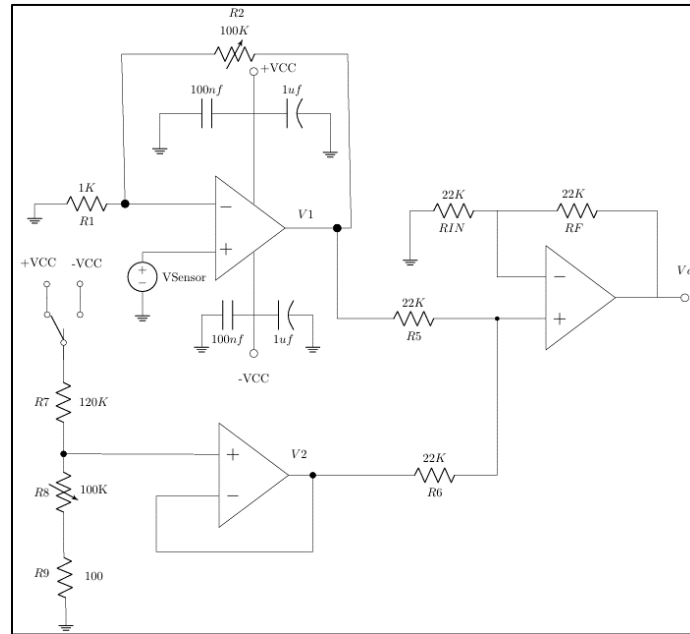


Figura 28. Circuito esquemático de escalador de voltaje.

El circuito consta de un amplificador no inversor junto a un sujetador de voltaje para un divisor de tensión conectados a través de un sumador no inversor.

Para calcular el primer voltaje correspondiente al amplificador no inversor podemos hacer uso de la ecuación 25:

Ecuación 25.
$$V_1 = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_{\text{SENSOR}}$$

El V2 corresponde a un divisor de tensión ajustable mediante una resistencia variable seguido por un sujetador de voltaje y con ello evitar problemas por desacople de impedancias. Podemos obtener el valor de V2 con la ecuación 26:

Ecuación 26.
$$V_2 = \left(\frac{R_8 + R_9}{R_7 + R_8 + R_9} \right) (V_{CC})$$

Con Vo hay que calcular un sumador no inversor, donde sumamos o restamos (según sea el caso), los valores de V1 y V2. En la ecuación 27 observamos la fórmula matemática para calcular el voltaje de salida de un sumador inversor de dos entradas con ganancias diferentes, pero para nuestro caso

tenemos que $R_5 = R_6 = R_{IN} = R_F$. Así obtenemos la ecuación 28 para el voltaje de salida de nuestro escalador.

Ecuación 27.
$$V_O = \left(\frac{R_F}{R_{IN}} + 1 \right) \left(\frac{1}{R_5 + R_6} \right) (V_1 R_6 + V_2 R_5)$$

Ecuación 28.
$$V_O = (V_1 + V_2)$$

Realizamos el diseño a dos capas en NI Utilboard 14.2, empleando elementos SMD Y truehole con el objetivo de reducir el tamaño de la PCB. Posterior al diseño se llevó a cabo su manufactura siguiendo el mismo procedimiento que se llevó con anterioridad.

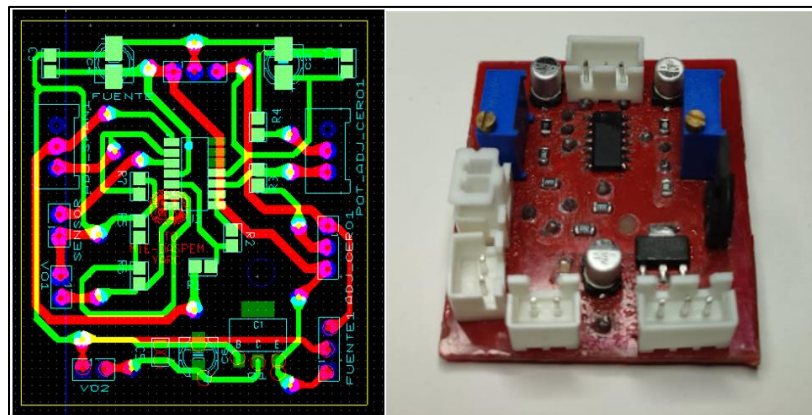


Figura 29. Diseño y manufactura de circuito escalador de voltaje.

2.4.3. Sensor de temperatura y humedad

Se incluyo dentro de la propuesta el emplear un sensor de temperatura y humedad como parte del complemento del sensor TGS2620. Dado que el sensor de gases que se ha empleado es sensible a la temperatura, requiere un rango específico para ambas variables y así garantizar mediciones y evitar daños.

Para temperatura:

- Recomendado entre -10°C y 50°C.

- Rango optimo entre 20° C y 30°C.

Para humedad:

- Rango recomendado entre 30% y 85% de humedad relativa.
- Rango óptimo entre 40% y 60%.

Exponer el sensor a condiciones fuera de estos rangos puede suponer en lecturas poco fiables y a su vez reducir la vida útil del nuestro sensor. [19]

Una vez mencionado el problema de los rangos de operación para temperatura y humedad, el uso de un sensor o transductor que nos brinde la capacidad de notar en que rango se encuentra el sistema desarrollado. Par ello se ha seleccionado un sensor digital DHT22. [27]

Variable	Rango	Precisión
Temperatura	-40 a 80°C	±0.5°C
Humedad relativa	0 A 100%	±2%

Figura 30. Rangos de medición del sensor DTH22.

En la tabla X, se muestran los valores de medición del sensor DHT22 en condiciones normales de funcionamiento, el cual cumple con las necesidades del proyecto y nos brinda la posibilidad de realizar ambas mediciones a través de un mismo dispositivo.

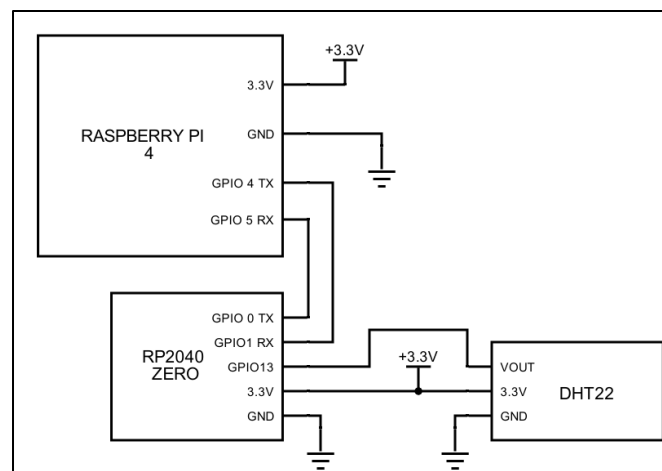


Figura 31. Diagrama de conexión entre Raspberry Pi 4 y el microcontrolador RP2040 para sensado de temperatura.

Para su implementación se ha utilizado un microcontrolador RP2040, en vez de conectarlo directamente a la tarjeta principal (Raspberry pi 4), esto se debe a que por el tipo de señal que entrega el sensor, causaría complicaciones o inconsistencias en las lecturas. Las lecturas del DHT22 pueden usar la CPU de la Raspberry pi 4 en momentos críticos si no se gestionan bien, lo que podría interferir con el rendimiento de la interfaz gráfica, generando posibles retrasos o congelamientos.

Por ello, se habilitaron los puertos seriales de Raspberry pi 4 para poder realizar mediciones desde un microcontrolador y enviar los datos de temperatura y humedad para ser procesados y/o mostrados en una interfaz visual.

2.4.4. Variador de velocidad de extractor de aire

Hemos seleccionado un extractor de aire con un motor de 110 VAC a 18 W de potencia, capaz de mover un volumen de aire de $5\text{ m}^3/\text{h}$. Para el caso de la cabina donde las dimensiones nos indican un volumen interno de 0.216 m^3 .

Para el control del motor se diseñó un módulo atenuador de CA con detector de cruce por cero. Lo que se busca es que a través de un TRIAC logremos conmutar el encendido y el apagado de la alimentación del motor a intervalos cronometrados de forma precisa y a su vez se sincronicen con la señal de AC.

Tomando en cuenta que la tarjeta de desarrollo encargada del control del sistema y la interfaz, se optó por incorporar un microcontrolador RP2040 (como el que habíamos utilizado en el sensor de temperatura) al módulo para ser el encargado de gestionar el circuito que se muestra en la figura 32. A través del módulo podemos monitorear la onda de CA para determinar el momento de encender y apagar el TRIAC BTA24. Se ha utilizado otro microcontrolador dado que la medición del sensor DHT22 interfiere en los tiempos de activación del TRIAC.

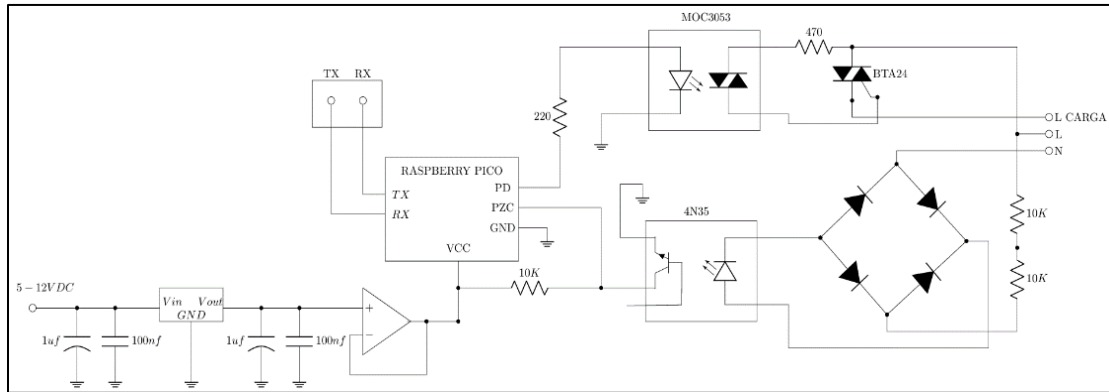


Figura 32. Circuito controlador de fase.

El circuito está formado por tres bloques:

- El primero para la alimentación del microcontrolador, donde se cuenta con una entrada para voltaje de 6.5 VDC a 12 VDC, seguido por capacitores de desacople y un regulador AMS1117 a 5V para concluir en un sujetador de voltaje formado por un OPAMP LM358.
- La segunda parte está formada principalmente por el microcontrolador, las líneas de comunicación serial y las señales digitales generadas por los elementos optoacoplados.
- La tercera parte consta de un detector de cruce por cero (4N35) para una fuente de CA, el cual está optoacoplado a un fototransistor. Por otra parte, también se tiene un circuito optoacoplado (MOC3053) para el disparo del TRIAC BTA24. Resulta necesario incluir elementos que aíslen los circuitos de baja tensión de los circuitos de potencia para proporcionar seguridad a la parte de control. Así como mantener separado el plano de potencia de la parte de control de la parte de potencia.

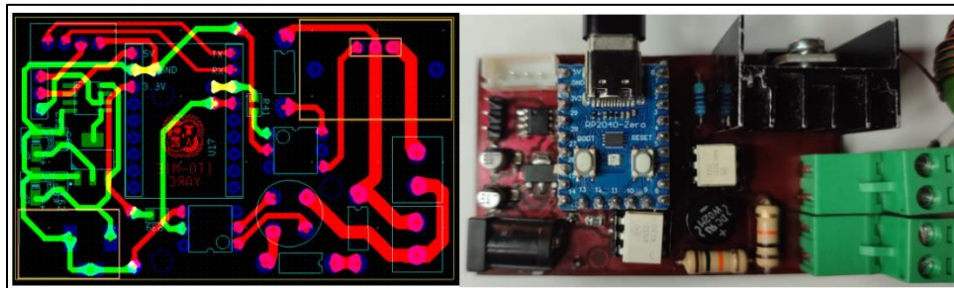


Figura 33. Diseño y manufactura de modulo controlador de fase.

El detector de cruce por cero proporciona un valor de voltaje de estado alto (3,3 VDC), el cual es detectado en el microcontrolador y nos permite establecer un pin en estado alto para disparar el TRIAC en el momento adecuado y acorde a un ángulo recibido desde la interfaz por comunicación serial.

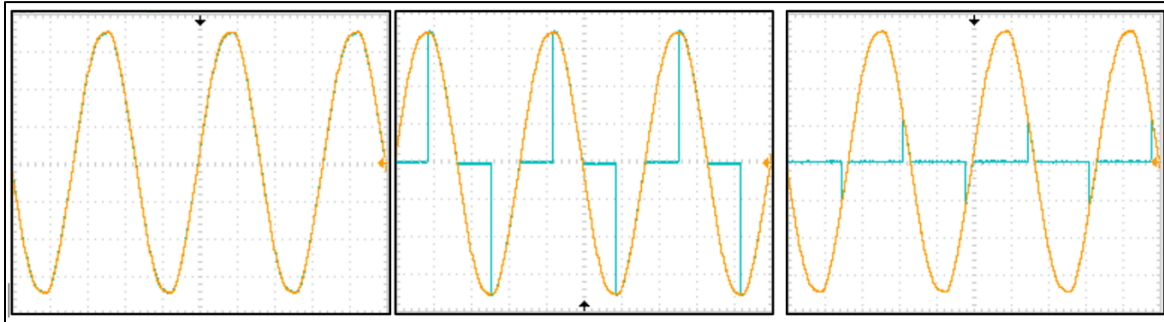


Figura 34. Forma de onda de 110 VCA A 60 Hz para 0°,90° y 160° respectivamente.

En la figura de arriba tenemos la forma de onda observada desde un osciloscopio, donde se aprecia el retrasado en la fase de CA de la salida del módulo en comparación con la onda proveniente del suministro. Entre más nos acerquemos a el ángulo cero tendremos menos retraso en su ciclo en la señal de CA, implicaría mayor potencia para la carga. De la misma manera al acercarnos a 180 grados, el retraso para el disparo aumenta y la potencia para la carga disminuye.

2.4.5. Tarjeta de control Raspberry Pi 4

Teniendo en cuenta las características de la tarjeta Raspberry pi 4 model B, se propuso el desarrollo de una tarjeta complementaria para dotarle a la Raspberry pi 4 el hardware necesario para recibir señales analógicas provenientes de sensores. Para esto se contempló el usar un convertidor analógico–digital (ADC) externo. El ADS1115 es un ADC de cuatro canales de 16 bits de resolución, lo cual ofrece una conversión precisa a diferentes rangos de voltaje entrada. Utiliza la interfaz I2C para la comunicación, esto facilita su integración con otros dispositivos.

Este módulo complementario también cuenta con una salida digital aislada mediante componentes optoaislantes y un relevador de bobina, con el propósito de llevar el control a la parte de electrónica de potencia.

De igual manera se contemplaron los conectores para sensores digitales que se conectan a el bus I2C y regulador de voltaje a 5 V.

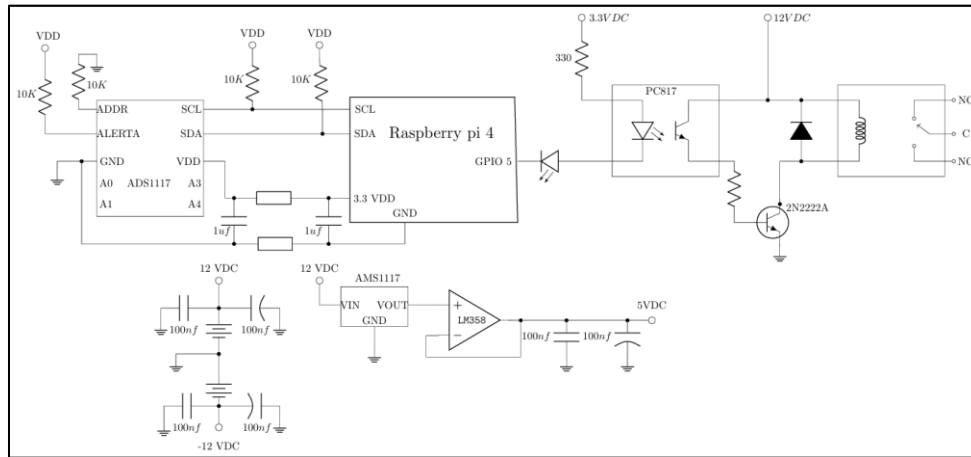


Figura 35. Diagrama de circuito del módulo complementario de Raspberry pi 4.

En la figura 35 se observa el diagrama eléctrico para el módulo que va ir montado sobre la tarjeta de desarrollo, el cual se llevó a diseño PCB y manufactura.

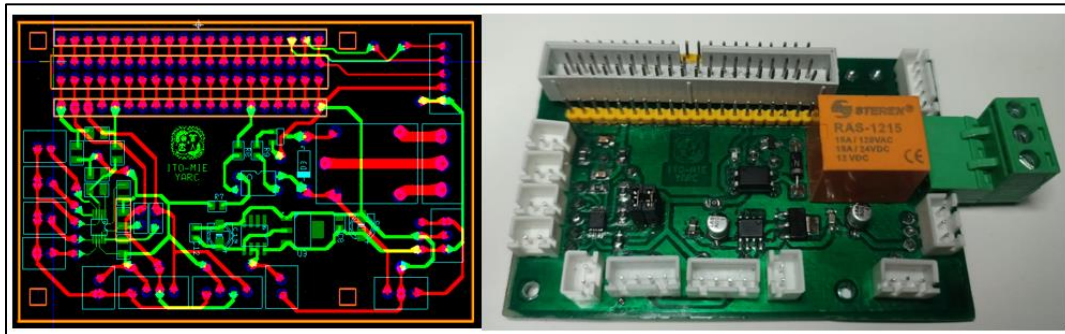


Figura 36. Diseño y manufactura de circuito módulo complementario de Raspberry pi 4.

2.5. Habitáculo del sensor de gases

Tras haber diseñado la parte electrónica para el sensor de gases, resulta útil alojar el sensor TGS2620 en un habitáculo adecuado para obtener lecturas precisas y proteger el sensor de factores externos, además de buscar un punto de mayor retención del gas para mejorar la medición. Al mismo tiempo hemos propuesto que el direccionamiento de la corriente del aire incida en el sensor de forma perpendicular al elemento reactivo, con el objetivo de mejorar dicha medición.

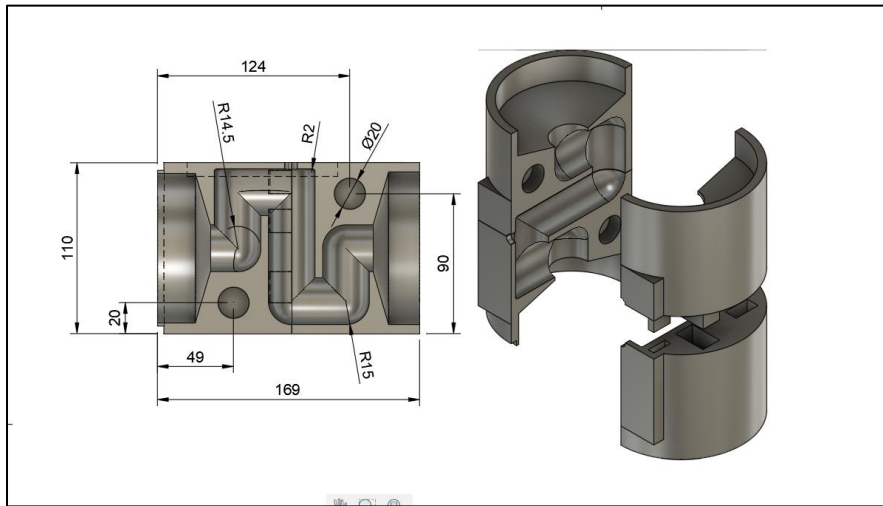


Figura 37. Diseño asistido por computadora de habitáculo del sensor de TGS2620.

En la imagen superior es mostrado el diseño propuesto para el habitáculo, el que se llevó a impresión en material PETG y en diferentes secciones a conveniencia de la disposición de la impresora empleada y tiempos de impresión.



Figura 38. Diseño impreso del habitáculo.

Unidas las piezas impresas, se sellan con silicona para tener un espacio hermético y poder llevar a cabo la fijación del sensor en su posición final para proceder a su fijación a la estructura de la cabina con sus respectivas mangueras de conducción de aire, como se muestra en la figura 39.



Figura 39. Sensor de gas dentro de habitáculo en su posición final en la cabina.

2.6. Interfaz gráfica

Para la interfaz visual hemos optado por incorporarle al sistema una pantalla HDMI de 7 pulgadas que sirva como HMI (Human- Machine Interface), la cual es compatible como monitor de la Raspberry pi 4, facilitando su integración.

A partir de las dimensiones de la pantalla y apoyándonos de software Autodesk fusión, para el diseño en 3D, se obtuvo una carcasa que nos apoye como soporte para la integración del módulo de complementario de la Raspberry y fijación a la cabina.

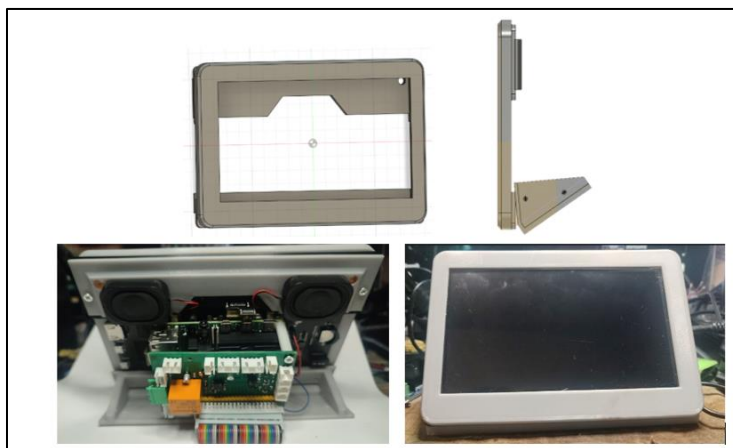


Figura 40. Diseño y manufactura de carcasa para pantalla.

Continuando con el diseño de la interfaz, caemos en la herramienta gráfica QTDesigner, la cual nos facilita la creación de interfaces de usuario (UI) sin la necesidad de realizar código manualmente haciendo uso de bloques arrastrables sobre el área de visualización.

Partiendo de nuestras necesidades colocamos elementos que nos ayuden a mostrar la información que consideramos importante y que sea entendible para el usuario, así como botones digitales para accionamiento de actuadores y control de señales. Como parte final de este proceso, convertimos el archivo a “.py” para poder agregarlo y conectarlo a la lógica de aplicación de nuestro código principal.

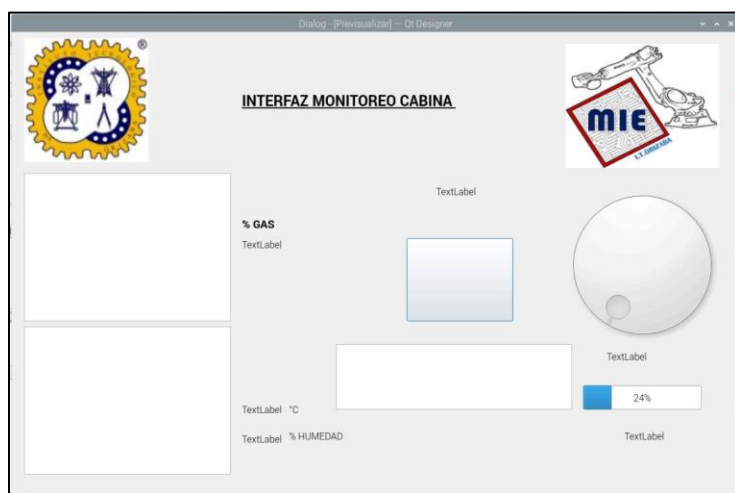


Figura 41. Interfaz de usuario diseñada en QTDesigner.

2.7. Programación en Python

Para la programación de todo el sistema se ha recurrido a Python ya que es un lenguaje de alto nivel conocido por su simplicidad y amplia variedad de aplicaciones, desde desarrollo web, análisis de datos o automatización.

En la integración con la tarjeta Raspberry Pi, existe una amplia variedad de bibliotecas y soportes que le ofrecen una ventaja para su selección para este proyecto.

Para este punto se tiene una visión más clara sobre los elementos que conforman el sistema, su propósito individual y en complemento.

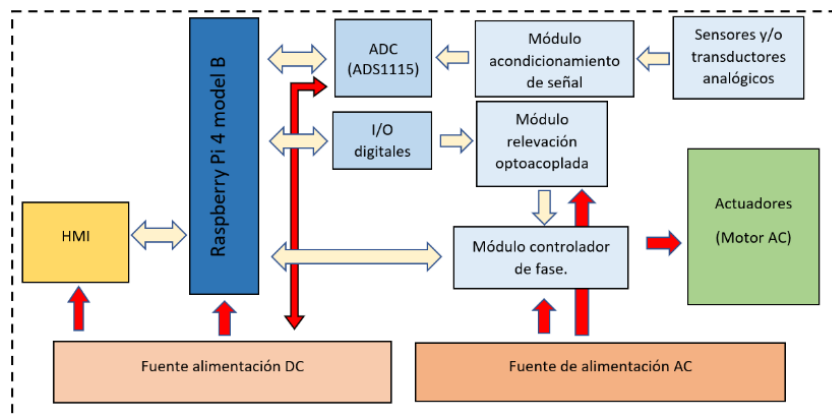


Figura 42. Diagrama a bloques del sistema.

En la figura 42 observamos un diagrama a bloques del sistema, el cual nos da un apoyo sobre el algoritmo para la lógica de programación del control del hardware.



Figura 43. Interfaz desde la Raspberry pi 4.

2.7.1. Programación de ADC.

El ADS1115 utiliza el protocolo I2C, siendo esta una ventaja al emplear más de un dispositivo. Para poder establecer el bus de comunicación se emplearon librerías especializadas que facilitan gran parte de la configuración, se debe tener en cuenta que cada dispositivo que se conecte al bus, se necesita especificar la dirección que este tomará en la memoria, 0x48 o 0x49 para un segundo ADS1115, valores que ya vienen preestablecidos para este dispositivo.

Al tener lectura en el puerto analógico en valores estándar para nuestra tarjeta, fuimos capaces de interpretar dichos valores de voltaje y convertirlos a la unidad de la variable de interés.

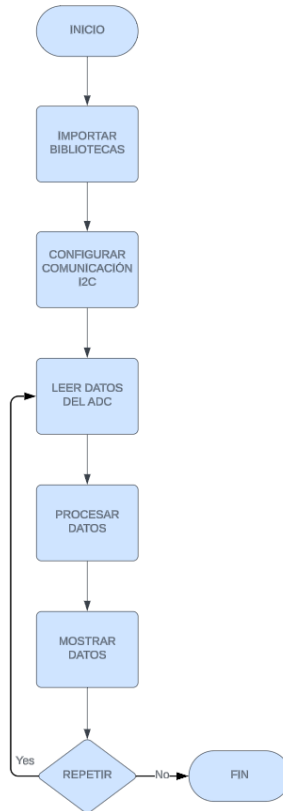


Figura 44. Diagrama de flujo para programación de ADC.

2.7.2. Programación circuito de potencia.

Para la programación del módulo de potencia, hay que tener en cuenta que se ha seleccionado un microcontrolador de la familia de Raspberry, el cual se ha programado en MicroPython, esto nos ofrece una mezcla perfecta de simplicidad, eficiencia y flexibilidad para proyectos embebidos, siendo ideal para quienes quieren desarrollar aplicaciones para microcontroladores sin las complejidades del desarrollo en lenguajes de bajo nivel.

Hay algunas consideraciones antes de pasar a la parte de programación, el voltaje de corriente alterna en México es a 60 Hz, esto quiere decir que realiza 60 ciclos sobre segundo. Teniendo ese dato necesitamos obtener el periodo del semiciclo positivo.

Ecuación 29.
$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{60} = 16.666 \times 10^{-3} \text{ segundos}$$

Por cada ciclo completo la señal de alterna tarda 16.66 milisegundos, de esta manera sabemos que son 8.33 milisegundos para el semiciclo positivo de la onda, equivalente a 180° , este tiempo podemos observarlo representado en la imagen de abajo como t_3 . Al dividir el tiempo entre los 180° tenemos que cada ángulo equivale a 46 microsegundos, este tiempo es de considerar el momento de generar el retardo del disparo del TRIAC, lo podemos observar representado como t_1 . Por último, tenemos t_2 el cual es el tiempo que el TRIAC va estar activado y podemos ajustar a conveniencia.

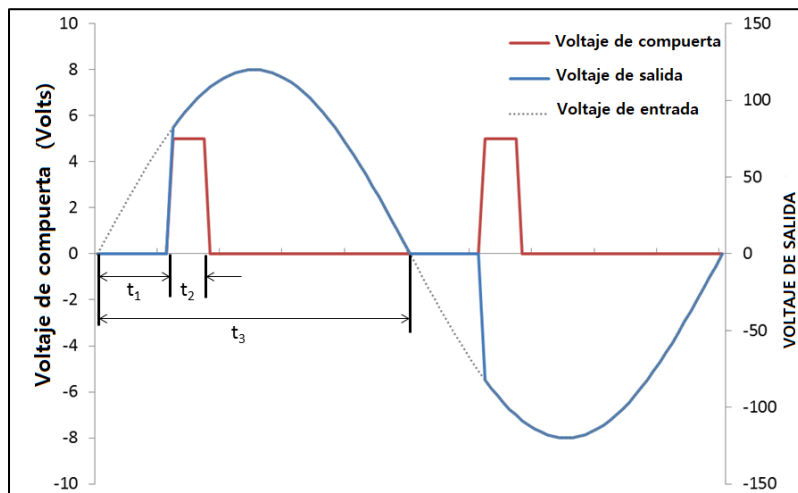


Figura 45. Forma de onda AC con representación de tiempos.

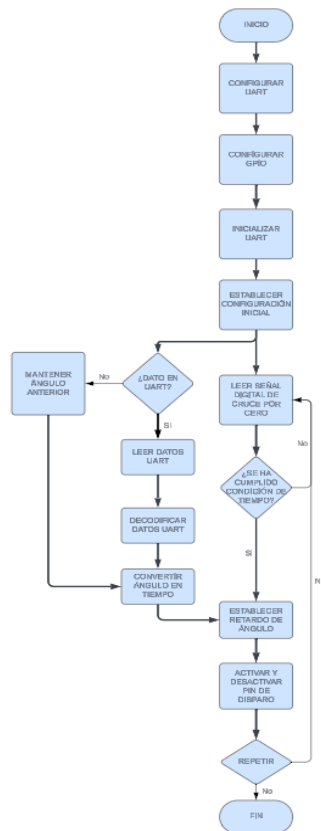


Figura 46. Diagrama de flujo para programación de modulo controlador de fase.

2.8. Figura modelo de prueba

Una prueba estándar nos proporciona un marco claro y repetible para evaluar el desempeño bajo condiciones controladas y asegurar que los diferentes módulos y componentes en integración interactúan como se espera. Parte de la comprobación del sistema está basado en una prueba estándar bajo criterios propios que hemos propuesto dadas las características y objetivos del proyecto.

Esta prueba consiste en el depósito de material ABS bajo condiciones controladas, para esto nos hemos apoyado de un modelo de calibración de impresión fijada a 10 gramos de material, en un tiempo aproximado de 2 horas con 36 minutos.

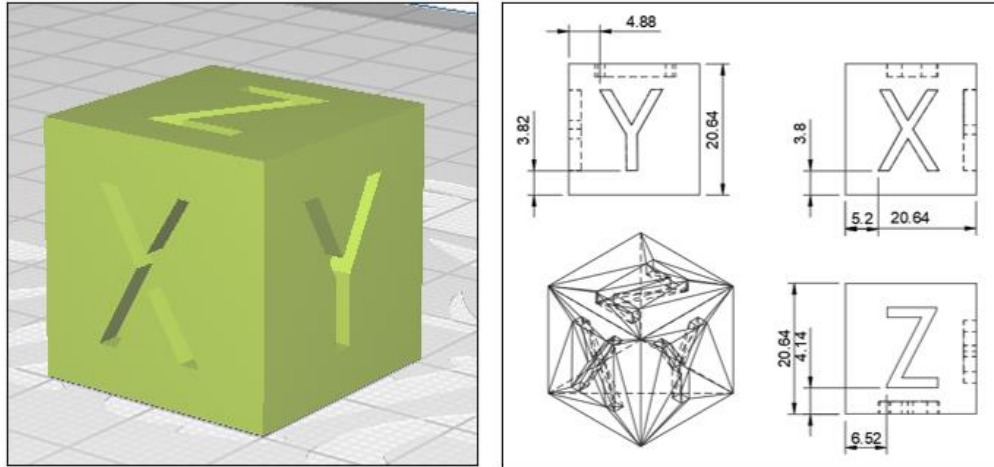


Figura 47. Modelo para prueba de sistema.

Parámetros de impresora:

Condición	Valor
Densidad de relleno	100 %
Patrón de relleno	Líneas
Velocidad de impresión inicial	20 mm/s
Velocidad de impresión	50 mm/s
Temperatura de impresión	240 °C
Temperatura de placa de impresión	90°C
Velocidad de ventilador	0 %
Boquilla	0.4 mm

Figura 48. Parámetros de impresora.

Los parámetros de la impresora están establecidos en gran parte por las capacidades de la impresora y el tipo de material que se va extruir. Una gran ventaja del uso de software laminador como lo es UtilMaker Cura es la facilidad que brinda al usuario el tener acceso a los parámetros de impresión, así como recomendaciones para diferentes casos de impresión.

2.9. Protocolo propuesto de medición

Parte importante de la validación del proyecto se encuentra sustentada en la eficiencia para la reducción de las emisiones de gases tóxicos contaminantes dentro de la cabina de impresión y fueron requeridas algunas pruebas bajo un protocolo repetible en diferentes condiciones, que nos proporcionen las herramientas ante una evaluación de eficiencia.

El protocolo consiste en una serie de pasos que nos permitieran establecer pruebas bajo condiciones similares:

1. Se enciende el sistema, calentamiento del sensor de gases durante 5 minutos.
2. Inicia circulación de aire durante 5 minutos.
3. Inicia calentamiento de impresora, el extrusor y la cama deben alcanzar las temperaturas adecuadas para el material ABS. Proceso de 8 minutos.
4. Inicia proceso de impresión de la pieza que hemos propuesto de 10 gramos de material ABS. (Proceso de 2 horas con 36 minutos)
5. Finaliza impresión, reposo durante 10 minutos para toma de lecturas posterior a temperatura de cama.
6. 10 minutos después se apaga sensor.

Una vez establecido los parámetros de impresión y el protocolo, la comprobación del sistema se divide en tres pruebas de condiciones diferentes que se han considerado como parte importante de la evaluación del desempeño del sistema:

a) Prueba 1

Consiste en impresión de 10 gramos de material ABS en la cabina bajo las condiciones que se han establecido, sin hacer uso del extractor y sin filtro HEPA.

Condición	Estado
Filtración de aire	Sin filtro HEPA
Extractor	Apagado
Filamento	10 gramos de ABS

Figura 49. Condiciones de prueba 1.

b) Prueba 2

Consiste el proceso de impresión en la cabina bajo las condiciones que se han establecido sin depósito de material ABS, con extractor al 18 % de potencia (90 grados de ángulo de disparo del TRIAC, considerando 110° como valor mínimo para el torque suficiente para superar la inercia y carga del motor) del extractor y sin filtro HEPA.

Condición	Estado
Filtración de aire	Sin filtro HEPA
Extractor	Encendido 18%.
Filamento	Sin filamento

Figura 50. Condiciones de prueba 2.

c) Prueba 3

Consiste en la impresión 10 gramos de ABS en la cabina bajo las condiciones que se han establecido, con extractor al 18 % de potencia del extractor y filtro HEPA.

Condición	Estado
Filtración de aire	Filtro HEPA
Extractor	Encendido 18%.
Filamento	10 gramos de ABS

Figura 51. Condiciones de prueba 3.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se hace un concentrado a cerca de los resultados obtenidos en las pruebas del prototipo final. Abarca desde las simulaciones hasta las pruebas siguiendo el protocolo propuesto y descrito en el capítulo anterior. Podremos observar algunos concentrados en forma de tablas, así como en graficas a cerca de los datos obtenidos.

3.1. Convertidor PWM a corriente

Tras las pruebas experimentales del circuito convertidor, se obtuvieron las siguientes mediciones:

Ciclo de trabajo (%)	Voltaje(V)	Corriente
25%	2.53V	18.1 mA
50%	5.05 V	39.2 mA
75%	7.58V	46 mA
100%	10.10 V	49 mA

Figura 52. Resultados de convertidor PWM a corriente.

Tras hacer un análisis sobre los datos, somos capaces de describir la relación de la señal modulada por ancho de pulso enviada desde la interfaz en razón de un voltaje analógico. Como se observa en la gráfica, la tasa de cambio entre el ciclo de trabajo y voltaje es constante, mostrándonos una recta, esto quiere decir que la relación en un principio es lineal.

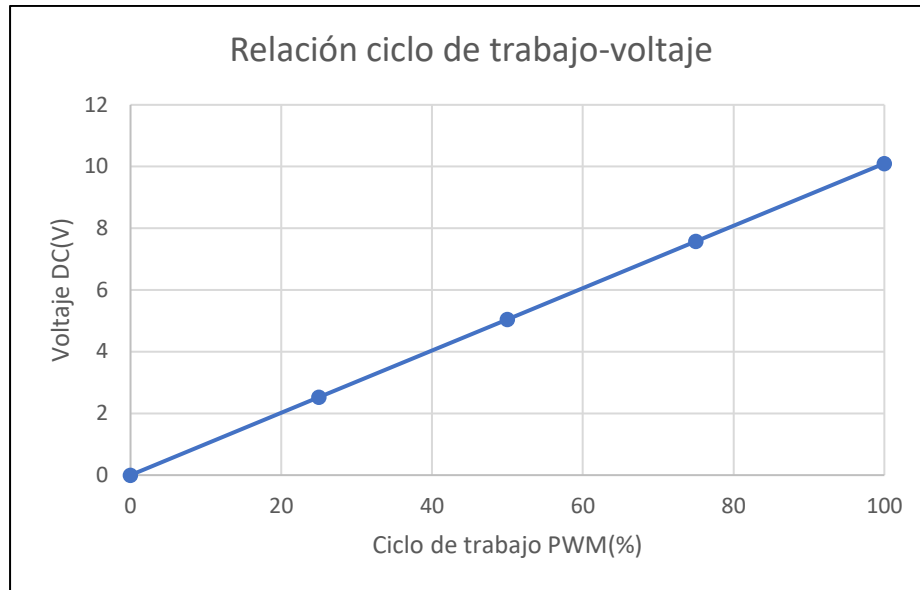


Figura 53. Gráfica de relación ciclo de trabajo y voltaje de salida.

Continuando con la relación entre el ciclo de trabajo y la corriente, podemos observar que pasando más del 50% del ciclo de trabajo tenemos un cambio notorio en la pendiente, nos indica que el incremento de la corriente se ve reducido al compararlo con el ciclo de trabajo. Esto es por mencionar un motivo la consecuencia del uso de transistores con factores de amplificación no idénticos en el espejo de corriente, esta brecha puede ser reducida al usar transistores con valores de beta más grandes, pero dada las necesidades el proyecto donde no se requiere un ajuste de mayor precisión, no representa mayor problema o inconveniente.

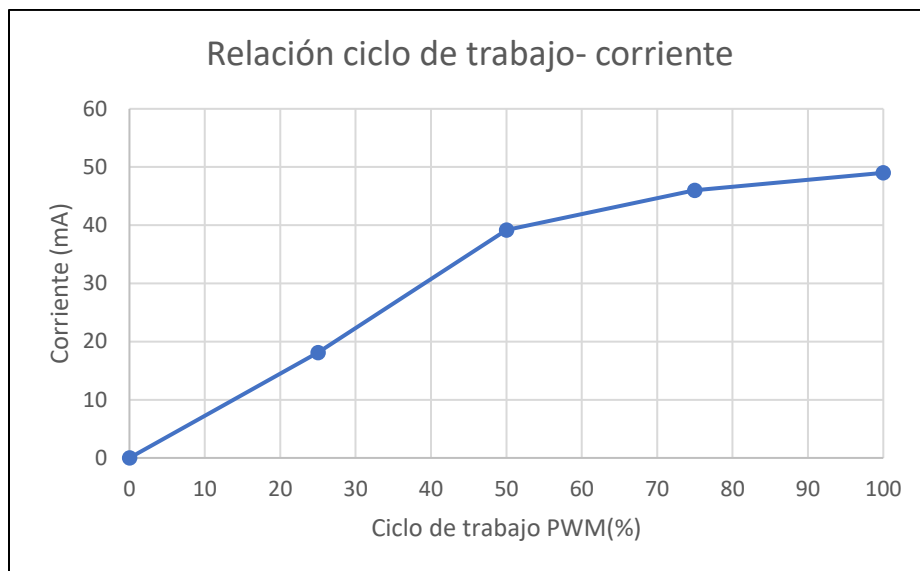


Figura 54. Gráfica de relación ciclo de trabajo y corriente en sensor.

3.2. Circuito escalador

Calibración del escalador. Se realizó un ajuste iterativo (manualmente), considerando una entrada de voltaje mínima de 0.5V con una salida de 532 mA, voltaje de entrada máxima de 0.6V con una salida de 4.93 V. Bajo las condiciones anteriores, se realizaron simulaciones del comportamiento del voltaje de salida, exportándose los resultados a Excel, generándose tablas y gráficas. Las simulaciones se realizaron bajo las siguientes condiciones: Simulación 1.- Entrada mínima de 0.2V con salida de 500mA y entrada máxima de 0.6V con salida de 4.9 V.

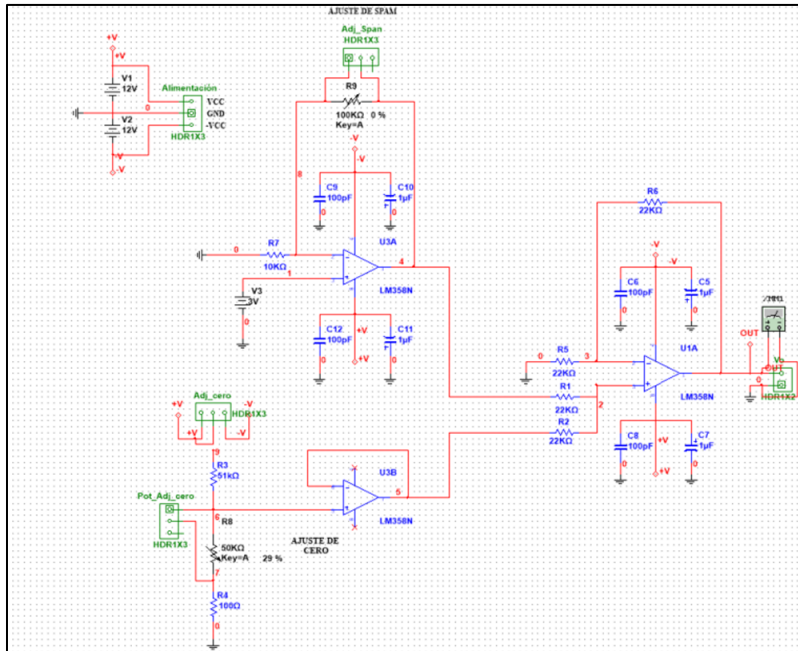


Figura 55. Simulación circuito escalador en Multisim 13.

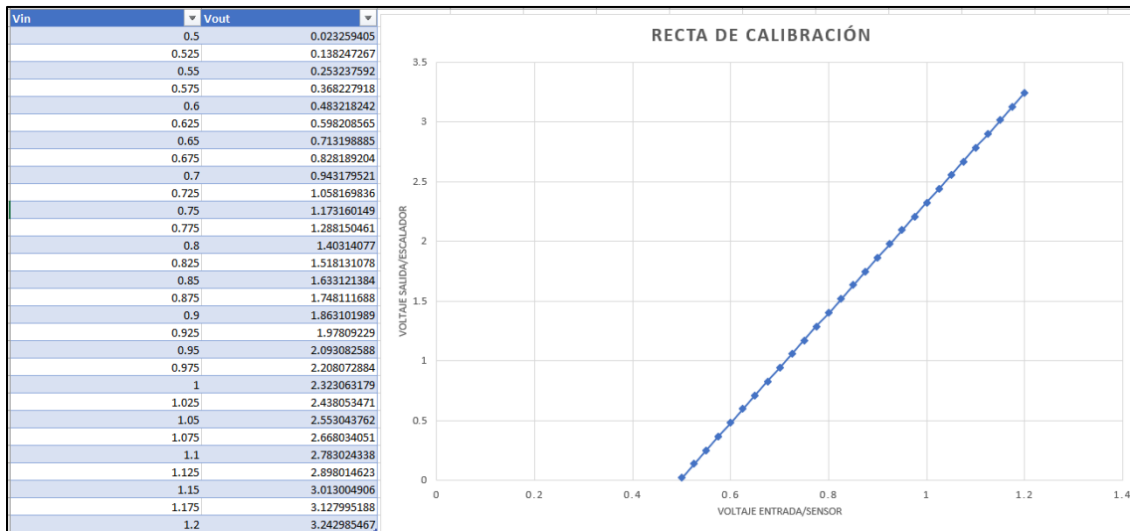


Figura 56. Valores de simulación en barrido en CD.

3.3. Mediciones pruebas

Una vez concluida las pruebas del prototipo podemos hacer un análisis de las lecturas registradas por los sensores durante el proceso.

3.3.1. Prueba 1

Como se ha descrito anteriormente, la primera prueba consiste en la impresión de 10 gramos de material ABS sin extracción de aire y filtración. Con el objetivo de exponer al sensor TGS2620 a una mayor concentración de vapores provenientes de la impresión los cuales se acumulan dentro en la cabina.

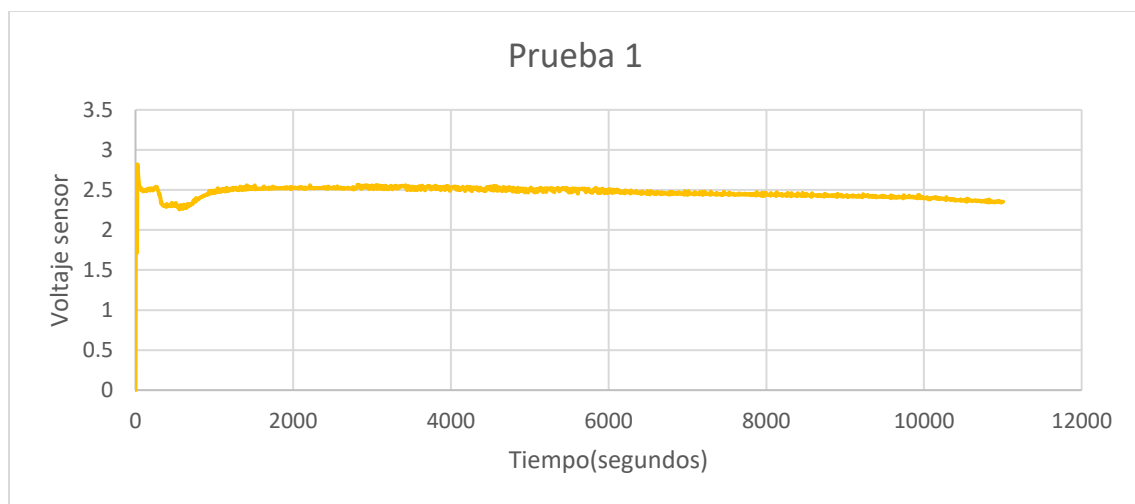


Figura 57. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 1.

En la gráfica de arriba observamos las lecturas del sensor con un tiempo de muestreo de 6 segundos durante toda la impresión.

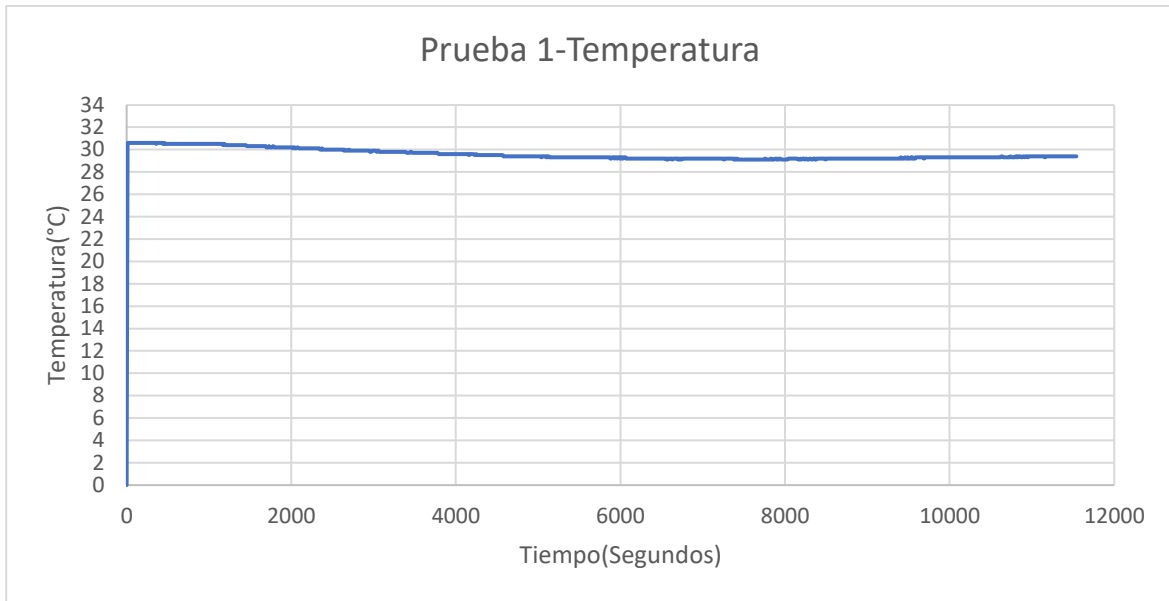


Figura 58. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 1.

En la figura de arriba se observa la gráfica de temperatura de la prueba 1, la temperatura dentro del habitáculo del sensor de gas se encuentra a la temperatura de 30°C con muy pocas variaciones.

3.3.2. Prueba 2

Para este caso, la condición consiste en la ausencia de depósito de material ABS y el filtro HEPA, pero haciendo uso del sistema de circulación de aire. Trazando el objetivo de no exponer al sensor TGS2620 a los vapores, pero si a la temperatura de cama y circulación de aire. A esta prueba se le consideró como una referencia a un valor cero exposiciones de vapores.



Figura 59. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 2.

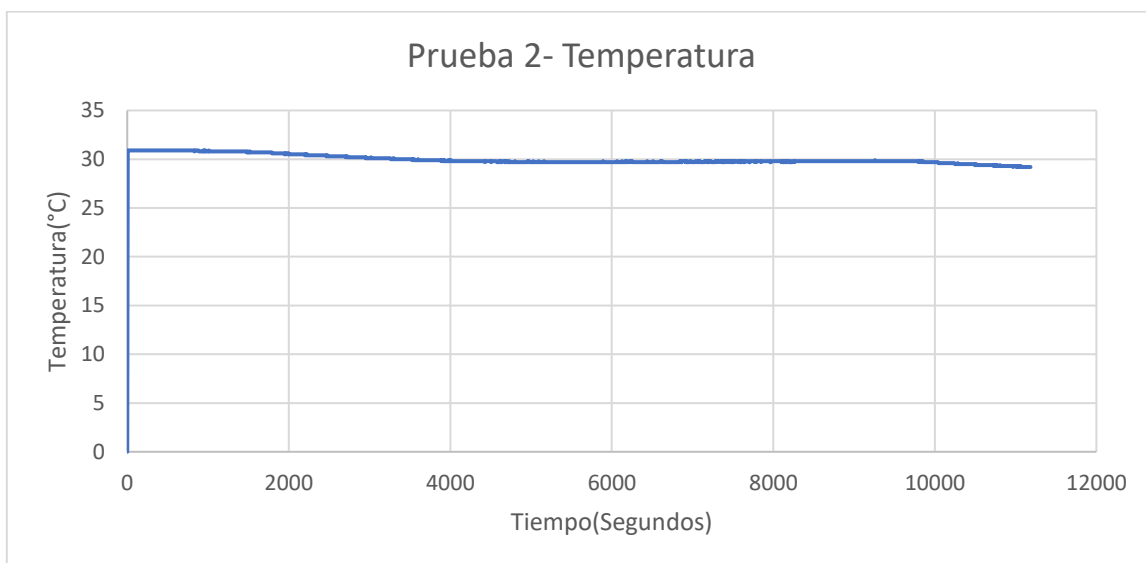


Figura 60. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 2.

En la figura 59 se aprecia los valores de temperatura dentro del habitáculo para la prueba 2, las variaciones de temperatura fueron mínimas durante todo el proceso de impresión, oscilando en valores cercanos a los 30°C.

3.3.3. Prueba 3

Consiste en la impresión 10 gramos de ABS en la cabina bajo las condiciones que se han establecido, al 18 % de potencia del extractor y filtro HEPA.

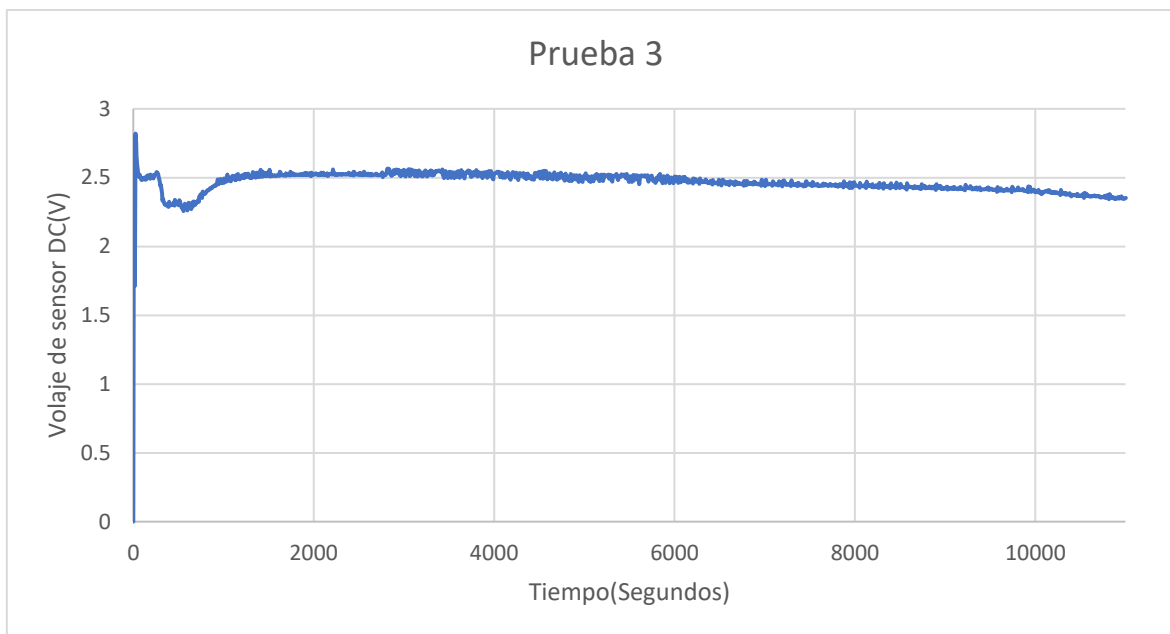


Figura 61. Gráfica de valores de sensor en relación al tiempo de impresión de prueba 3.

Esta prueba está pensada como el modo de operación normal del sistema, de esta manera obtener datos sobre cómo funciona el prototipo en su integración completa.

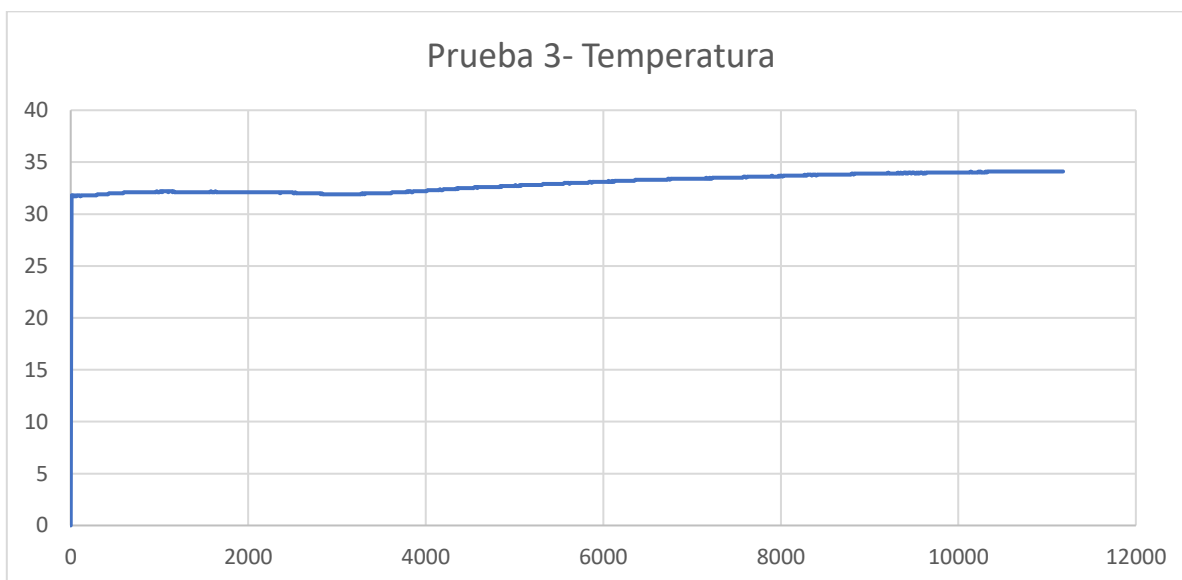


Figura 62. Gráfica de valores de sensor de temperatura en relación al tiempo de impresión de prueba 3.

3.4. Comparación de gráficas

Resulta importante la comparación de las tres pruebas, ya que nos brinda la posibilidad de ejercer un juicio de valor sobre la eficiencia del prototipo. Al haber propuesto diferentes pruebas con condiciones diferentes, resulta evidente que las lecturas registradas se encuentran en diferentes puntos de medición y nos brinda mayor validación debido a mayor espectro de casos posibles.

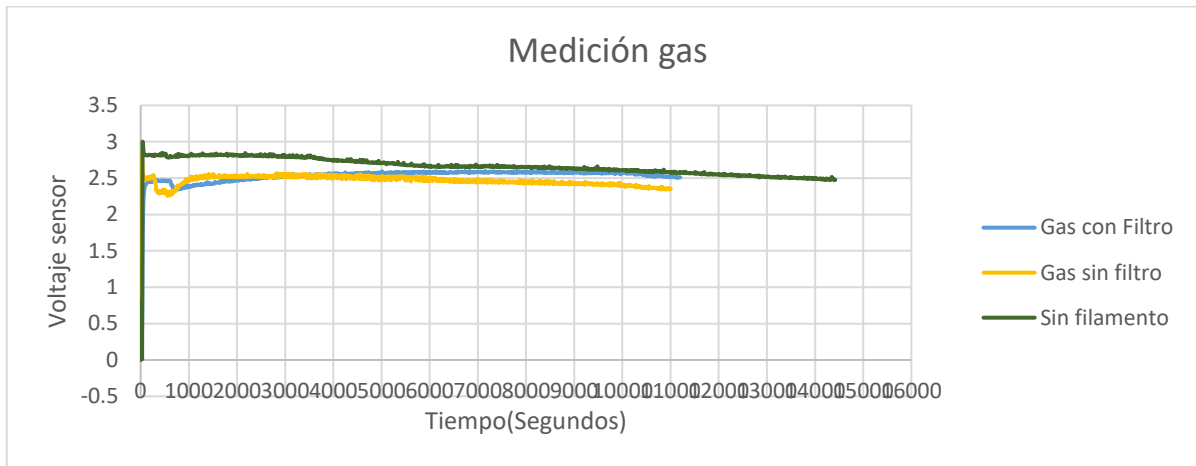


Figura 63. Comparación de resultados de sensor de gas en las pruebas.

Para los tres casos de pruebas se llevó a cabo la misma metodología, donde solo cambiaba la presencia de filamento o de filtro. Esto con el objetivo de establecer dos puntos de referencia que adoptaran la función de valor cero y valor máximo de presencia de vapores contaminantes. Los cuales están representados en color verde en la gráfica como el valor cero y amarillo como valor máximo. La diferencia entre ambas es la presencia del filtro HEPA, encargado de retener de manera física el material liberado en el proceso de impresión de ABS.

La grafica azul corresponde a la impresión de filamento haciendo uso del filtro HEPA, como podemos observar en el transcurso del tiempo de la prueba, la prueba sin filtro inicia de forma muy similar a la prueba con filtro, para posteriormente acercarse a las lecturas de la prueba sin filamento ABS.

CONCLUSIÓN

Este proyecto se diseñó y manufacturó de un sistema de filtración de aire en una cabina de impresión 3D de una impresora de deposición fundida para material ABS.

Para lograr esto, se fabricó una cabina partiendo de las dimensiones de la impresora, con el propósito de tener aislada la variable en lo mayor posible. Empleando un sistema de circulación de aire, el cual también fue desarrollado a partir de un microcontrolador, adquirimos influencia sobre el material liberado durante la impresión, direccionándolo sobre nuestro sistema de medición de solventes orgánicos, para el cual se propuso una geometría que nos permitía la incidencia y retención del gas sobre nuestro sensor especializado. Posterior a ello ser conducido a un filtro de partículas de alta eficiencia como método de captura y retención de material suspendido en el aire circulante. Siguiendo la trayectoria, el aire filtrado es liberado de regreso a la cabina. Por otro lado, se hizo provecho de la capacidad de la tarjeta de desarrollo principal para hacer uso de una interfaz visual del estado del proceso y manipulación sobre la extracción de aire, la cual también fue desarrollada para esta aplicación. Al ser un proceso repetitivo durante toda impresión, eventualmente podemos adquirir una lista de valores de lectura de sensores tan grande como nuestro tiempo de muestreo pueda recoger valores en el lapso del proceso y finalmente guardarlos en una de base datos para su interpretación.

En el desarrollo de los diferentes sistemas podemos decir que cada uno de los objetivos específicos fueron alcanzados en la integración del prototipo. En consiguiente, al haber establecido un protocolo de medición haciendo diferentes pruebas con el prototipo, obtuvimos una referencia medible para el funcionamiento del proyecto. En el cual concluimos que la concentración de material liberado en la cabina durante la impresión haciendo uso del filtro HEPA, llega a valores similares a una lectura sin la fundición del material ABS.

Finalmente podemos decir que la hipótesis de reducir las emisiones contaminantes de gases tóxicos generadas durante el proceso de impresión 3D por deposición fundida de filamento de ABS mediante el uso de un sistema de filtrado basado en filtros aire de alta eficiencia fue satisfecha.

REFERENCIAS

- [1] P. K. y. T. B. S. Wojtyla, "s 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 14, no. 6, pp. 80-85, 2017.
- [2] A. J. B. G. M. M., F. M. P. H. A. G. C. Z. R. P. María G. Juárez Gutiérrez, "Evaluación del consumo energético, emisiones de CO2 y partículas ultrafinas durante la impresión 3D con ABS y PLA," 2019.
- [3] R. F. L. y. M. A. K. L. Álvarez, "Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)," *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 24, no. Especial, 2016.
- [4] J. P. S. W. A. Y. D. M. S. B. y. R. J. W. Q. Zhang, "«Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers," *Aerosol Science and Technology*, vol. 51, pp. 1275-1286, 2017.
- [5] D. Z. C. P., N. E. C. y. B. S. P. Azimi, "Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments," *Environmental Science y Technology*, vol. 50, no. 3, 2016.
- [6] M. B., Q. Z., J. P. W. y. R. W. A. Davis, "Fine Particulate and Chemical Emissions from Desktop 3D Printers," *ASHRAE Annual Conference*, 2016.
- [7] B. R. O. J. T. J. y. S. M. T. L. Zontek, "An exposure assessment of desktop 3D," *Journal of Chemical Health and Safety*, pp. 15-25, 2017.
- [8] P. A., Z. E. O. y. T. R. B. Stephens, "Ultrafine particle emissions from desktop 3D," » *Atmospheric Environment*, pp. 334-339, 2013.
- [9] J. G. W. U. Salthammer, "Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer," *Environment International*, pp. 476-485, 2019.

- [10] L. A. L. R. L. A. C. G. LAURA MARCELA CARDOZO S., "MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA," *REVISTA TECNOLOGÍA Y PRODUCTIVIDAD*, pp. 31-41, 2017.
- [11] B. T. C. V. Blanca Pérez-Uz. M. Isabel de Silóniz, "Metodología de esterilización en el laboratorio microbiológico," *Reduca (Biología)*, pp. 1-14, 2010.
- [12] T. E. R. Muñoz, "Control radiológico de filtros de carbono y microbiológico de filtros HEPA en las Áreas del centro de Medicina Nuclear y Molecular en el Hospital Carlos Andrade Marín," *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR*, 2013.
- [13] E. C. E. Silva, "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MOVIMIENTO QUE PERMITA LA INYECCIÓN Y EL CONTROL DE CALIDAD DE FILTROS DE AIRE," *Universidad de los Andes*, 2020.
- [14] H. I. A. C. R. G. V. J. I. C. F. y. E. R. E. Alfredo CAMPOS TRUJILLO*, "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MÉTODO DE ALTO VOLUMEN PARA LA MEDICIÓN DE PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRAS." *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, pp. 79-88, 2015.
- [15] M. D., M. B. C.I. Paulo, "DISEÑO ÓPTIMO DE UN PROCESO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS," *Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires*, 2013.
- [16] A. C. J. N. B.A.Garro Licón, "Reconocimiento de partículas contaminantes por medio de dispositivos láser usando técnicas clásicas de clasificación," *Centro de Investigación en Computación-IPN*, 2017.
- [17] M. M. C. Valera, "Simulación y diseño de un sensor acústico piezoeléctrico para detección de partículas," *UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA*, 2016.
- [18] A. f. T. S. a. D. Registry., "ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.," 06 Mayo 2016. [Online]. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts110.html. [Accessed 01 Diciembre 2021].
- [19] Figaro Engineering Inc., *TGS 2620 - for the detection of solvent vapors*, Datasheet, Rev. 03, Apr. 2005. [Online]. Available: https://www.figaro.co.jp/en/product/docs/tgs2620_product%20information_rev03.pdf

- [20] A. O. Gil, LAS IMPRESORAS 3D COMO HERRAMIENTAS CIENTÍFICAS, Observatori Astronomic de la Universitat de Valencia.
- [21] M. toner, «Mas Toner,» 02 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://mastoner.com/blog/diferencia-entre-filamento-pla-y-abs/>.
- [22] J. A. Restrepo, «Compuestos orgánicos volátiles,» *INPRA LATINA*, 2006.
- [23] M. A. Lagarda, «Relaciones entre el ozono troposférico, las partículas ultrafinas y los episodios de formación de partículas en Granada,» Universidad de Granada, Granada, 2020.
- [24] E. G. G. P. R. R.-L. M. Sebastián Fredes, «Utilización de filtros bacterianos/virales durante la ventilación mecánica invasiva,» *MEDICINA INTENSIVA*, 2013.
- [25] Renesas Electronics Corporation, *Operational Amplifiers: Boosting Op-Amp Output Current*, Application Note R13AN0008EU0100 Rev.1.00, Jul. 2, 2020. [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/operational-amplifiers-boosting-op-amp-output-current-r13an0008eu0100-rev100>
- [26] S. Winder, *Analog and Digital Filter Design*, 2nd ed. Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [27] Aosong Electronics Co., Ltd., *AM2302/DHT22 Temperature and Humidity Sensor Datasheet*, 2018. [Online]. Available: <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf>
- [28] B. Carter and R. Mancini, *Op Amps for Everyone*, Texas Instruments, Application Report, 2002. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>